

# ИЗМЕРЕНИЕ $\theta_{13}$ , $\Delta m^2_{32}$ И КОВАРИАНТНАЯ КВАНТОВО-ПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ НЕЙТРИННЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ.

Д. В. Наумов

Объединенный Институт Ядерных Исследований

Дубна, 2016

## 1. Актуальность

- ▶ Смешивание в Стандартной Модели
- ▶ Статус (PDG2016)
- ▶ Неполнота плосковолновой модели нейтринных осцилляций

## 2. Ковариантная квантово-полевая теория нейтринных осцилляций

- ▶ Программа действий
- ▶ К теории волнового пакета
- ▶ Ковариантный волновой пакет в КТП
- ▶ Модель релятивистского гауссова пакета
- ▶  $S$ -матричный формализм с волновыми пакетами
- ▶ Процесс с нарушением флагмана
- ▶ Вероятность осцилляций. Стационарный источник
- ▶ Вероятность осцилляций. Нестационарный источник

- ▶ Первое ограничение из данных Daya Bay

### 3. Измерение $\theta_{13}$ и $\Delta m^2_{32}$ в эксперименте Daya Bay

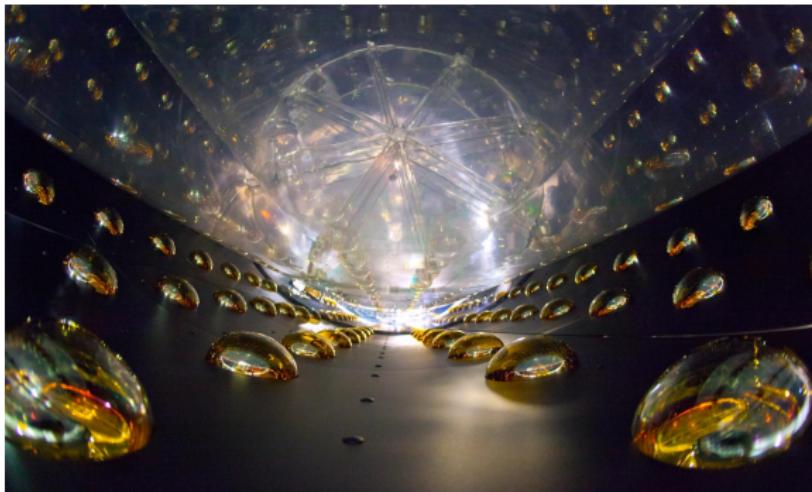
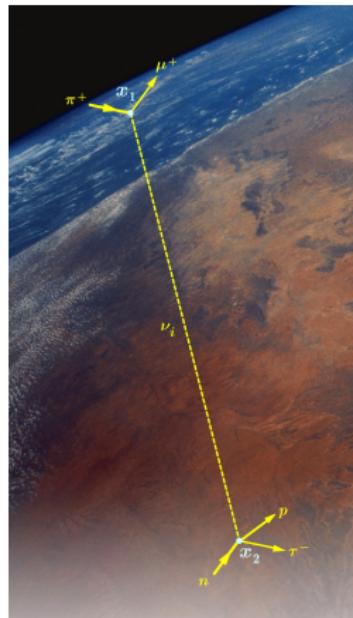
- ▶ Антинейтрино от реактора
- ▶ Эксперимент Daya Bay
- ▶ Результаты. Сравнение наблюдений в ближнем и дальнем холлах
- ▶ Результаты осцилляционного анализа
- ▶ Результаты измерения потока антинейтрино
- ▶ Результаты измерения спектра антинейтрино

### 4. Формальности

- ▶ Цели и задачи
- ▶ Основные положения, выносимые на защиту
- ▶ Список статей по теме диссертации
- ▶ Апробация работы
- ▶ Научная новизна

- ▶ Практическая значимость
- ▶ Премии
- ▶ Публикации

## 5. Благодарности



- ▶ Поколения夸克ов и лептонов с определенной массой не смешиваются во взаимодействиях с  $\gamma, Z^0$ , но смешиваются во взаимодействиях с  $W^\pm$
- ▶ Смешиванию соответствуют унитарные матрицы  $V_{CKM}$  (夸克) и  $V_{PMNS}$  (лептоны)
- ▶  $V_{3 \times 3}$  матрица смешивания:
  - ↪ 3 угла  $\theta_{ij}$ ,
  - ↪ 1 фаза  $\delta$  (2 доп. фазы для нейтрино Майораны) ↪ нарушение CP-инвариантности.
- ▶ Предмет исследования:
  - ↪  $\theta_{ij}, \delta$  и масса нейтрино  $m_i$

- ▶ Наблюдаемые, чувствительные к этим параметрам:
  - ↪ “Масса флагманского нейтрино”:  $m_\alpha^{\text{eff}} = \sum_i |V_{\alpha i}|^2 m_i$
  - ↪  $0\nu 2\beta$  распады:  $m_{\beta\beta} = |V_{ei}^2 m_i|$
  - ↪ Появление и исчезновение флагмана в нейтринных осцилляциях:  $\theta_{ij}, \delta, \Delta m^2_{ij}$
  - ↪ Космология и глубокие обзоры неба:  $\sum_i m_i$

## 1. Углы смешивания:

- ▶  $\sin^2_{12} = 0.304 \pm 0.014$
- ▶  $\sin^2_{23} = 0.51 \pm 0.05$
- ▶  $\sin^2_{13} < 0.04$ . Верхний предел Chooz. Актуальность №1

## 2. Массы:

- ▶  $\Delta m^2_{21} = (7.53 \pm 0.18) \cdot 10^{-5}$  эВ<sup>2</sup>
- ▶  $\Delta m^2_{32} = (2.44 \pm 0.066) \cdot 10^{-3}$  эВ<sup>2</sup> (нормальная иерархия)
- ▶  $\Delta m^2_{32} = (-2.51 \pm 0.066) \cdot 10^{-3}$  эВ<sup>2</sup> (обратная иерархия)
- ▶  $m_e^{\text{eff}} < 2.05$  эВ
- ▶  $m_{\beta\beta} < (0.120 - 0.250)$  эВ
- ▶  $\sum_i m_i \leq (0.12 - 0.23)$  эВ

## 1. Углы смешивания:

- ▶  $\sin^2_{12} = 0.304 \pm 0.014$
- ▶  $\sin^2_{23} = 0.51 \pm 0.05$
- ▶  $\sin^2_{13} = 0.0219 \pm 0.0012$ . Открытие Daya Bay

## 2. Массы:

- ▶  $\Delta m^2_{21} = (7.53 \pm 0.18) \cdot 10^{-5}$  эВ<sup>2</sup>
- ▶  $\Delta m^2_{32} = (2.44 \pm 0.066) \cdot 10^{-3}$  эВ<sup>2</sup> (нормальная иерархия)
- ▶  $\Delta m^2_{32} = (-2.51 \pm 0.066) \cdot 10^{-3}$  эВ<sup>2</sup> (обратная иерархия)
- ▶  $m_e^{\text{eff}} < 2.05$  эВ
- ▶  $m_{\beta\beta} < (0.120 - 0.250)$  эВ
- ▶  $\sum_i m_i \leq (0.12 - 0.23)$  эВ

└ Актуальность

└ Неполнота плосковолновой модели нейтринных осцилляций

1. Нейтринные осцилляции – на сегодня главный источник информации о  $V_{\alpha i}$  и  $\Delta m^2_{ij}$
2. Плосковолновая модель, однако, неполна и противоречива. Актуальность №2

└ Актуальность

└ Неполнота плосковолновой модели нейтринных осцилляций

## 1. Теория осцилляций нейтрино в двух словах.

- ▶ Эволюция во времени флэйворного состояния

$$|\nu_\alpha\rangle = \underbrace{\sum_i V_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle}_{\text{Флэйворное нейтрино}}$$

└ Актуальность

└ Неполнота плосковолновой модели нейтринных осцилляций

## 1. Теория осцилляций нейтрино в двух словах.

- Эволюция во времени флэйворного состояния

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \underbrace{\sum_i V_{\alpha i}^* e^{-iE_i t}}_{\text{Эволюция во времени}} |\nu_i\rangle$$

## 1. Теория осцилляций нейтрино в двух словах.

- ▶ Эволюция во времени флэйворного состояния

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \underbrace{\sum_i V_{\alpha i}^* e^{-iE_i t}}_{\text{Эволюция во времени}} |\nu_i\rangle$$

- ▶ приводит к ненулевому перекрытию с другим флэйворным состоянием  $|\nu_\beta\rangle$

$$\mathcal{A}_{\beta\alpha}(t) = \langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle$$

## 1. Теория осцилляций нейтрино в двух словах.

- ▶ Эволюция во времени флэйворного состояния

$$\langle \nu_\alpha(t) \rangle = \underbrace{\sum_i V_{\alpha i}^* e^{-iE_i t}}_{\text{Эволюция во времени}} |\nu_i\rangle$$

- ▶ приводит к ненулевому перекрытию с другим флэйворным состоянием  $|\nu_\beta\rangle$

$$\mathcal{A}_{\beta\alpha}(t) = \langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle$$

- ▶ которое (полагая  $t = L$ ) можно обнаружить с вероятностью осцилляций

$$P_{\beta\alpha}(L) = |\mathcal{A}_{\beta\alpha}(L)|^2 = \sum_{ij} V_{\alpha i}^* V_{\beta j}^* V_{\alpha j} V_{\beta i} e^{iL\Delta m_{ij}^2/2E}$$

## 1. Теория осцилляций нейтрино в двух словах.

- Эволюция во времени флэйворного состояния

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \underbrace{\sum_i V_{\alpha i}^* e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle}_{\text{Эволюция во времени}}$$

- приводит к ненулевому перекрытию с другим флэйворным состоянием  $|\nu_\beta\rangle$

$$\mathcal{A}_{\beta\alpha}(t) = \langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle$$

- которое (полагая  $t = L$ ) можно обнаружить с вероятностью осцилляций

$$P_{\beta\alpha}(L) = |\mathcal{A}_{\beta\alpha}(L)|^2 = \sum_{ij} V_{\alpha i}^* V_{\beta j}^* V_{\alpha j} V_{\beta i} e^{iL\Delta m_{ij}^2/2E}$$

2.  $V_{\alpha i}$  и  $\Delta m_{ij}^2$  измеряются при помощи  $P_{\beta\alpha}(L)$ .

- (I) в процессах рождения и детектирования нейтрино взаимодействует когерентная суперпозиция  $|\nu_\alpha\rangle = \sum_i V_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$ ;
- (II) состояния  $|\nu_i\rangle$  обладают определенными импульсами  $p_i$ ;
- (III) все импульсы  $p_i$  одинаковы ( $p_i = p$ );
- (IV) нейтрино являются ультраквазивакуумными, т.е.  $p^2 \gg \max(m_i^2)$ ;
- (V) время распространения нейтрино заменяется пройденным расстоянием  $t = L$ .

## Гипотеза (I)

в процессах рождения и детектирования нейтрино  
взаимодействует когерентная суперпозиция

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i V_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$$

- ▷ Почему массивные состояния нейтрино  $|\nu_i\rangle$  рождаются **когерентными**, а массивные заряженные лептоны  $e, \mu, \tau$  (видимо) **некогерентны**. Или осциллируют ли заряженные лептоны?
- ▷ Поля нейтрино и заряженных лептонов симметричны в СМ:

$$\mathcal{L} = \cdots - \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{\alpha i} V_{\alpha i} \bar{\ell}_{\alpha L} \gamma_\mu \nu_{i L} W^\mu + \text{h.c.}$$

## Гипотеза (II)

состояния  $|\nu_i\rangle$  обладают определенными импульсами  $p_i$

- ▷  $\delta p_\nu = 0$  означает неопределенное положение состояния  $\delta x_\nu = \infty$ . Невозможно корректно определить  $L$  в  $P_{\beta\alpha}(L)$ .

└ Актуальность

└ Неполнота плосковолновой модели нейтринных осцилляций. Критический анализ гипотез

### Гипотеза (III)

все импульсы  $p_i$  одинаковы ( $p_i = p$ )

- ▷ Противоречит Лоренц-инвариантности. Противоречит кинематике распадов.

## Гипотеза (IV)

нейтрино являются ультраквантами, т.е.

$$p^2 \gg \max(m_i^2)$$

- ▷ Для всех современных экспериментов эта гипотеза выполняется.
- ▷ Для реликтовых нейтрино не выполняется

## Гипотеза (V)

время распространения нейтрино заменяется пройденным расстоянием  $t = L$

- ▷ Ничтожная поправка вида  $v = p/E \simeq 1 - m^2/2p^2$ , увеличивает разность фаз  $\varphi_{ij}$  вдвое:

$$\varphi_{ij} = (E_i - E_j)t = \left(\frac{E_i}{v_i} - \frac{E_j}{v_j}\right)L = 2 \frac{\Delta m^2_{ij}}{2E}$$

- ▷ В экспериментах, где время распространения нейтрино не измеряется, по нему требуется проинтегрировать:

$$P_{\beta\alpha}(L) = \sum_i |V_{\alpha i}|^2 |V_{\beta i}|^2$$

некогерентная сумма, не зависящая от  $L$  и  $E$ .

- ✗ Гипотеза (I) требует количественного обоснования.
- ✗ Гипотеза (II) нефизична.
- ✗ Гипотеза (III) нефизична.
- ✓ Гипотеза (IV) выполняется для современных экспериментов и нарушается для реликтовых нейтрино.
- ✗ Гипотеза (V) необоснованна.

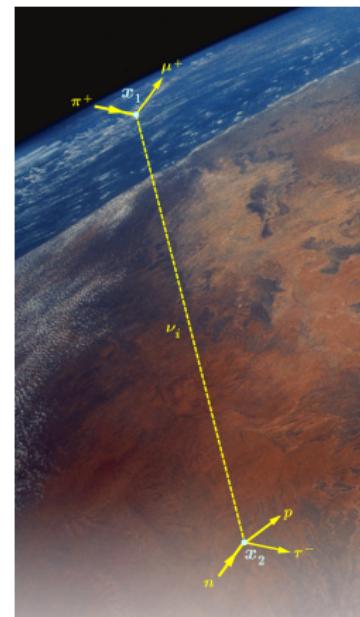
- ▶ Необходимо описание осцилляций нейтрино в рамках модели с **волновым пакетом**.
- ▶ Обсуждаются, в основном, два подхода:
  1. **КМ подход**: форма волнового пакета нейтрино постулируется. Обычно нековариантный гауссовый пакет:
    - ▷ Giunti Found.Phys.Lett. 17 (2004) 103-124
    - ▷ Bilenky, Giunti, Grimus Prog.Part.Nucl.Phys. 43 (1999) 1-86
    - ▷ M. Beuthe, Phys. Rev. D66 (2002) 013003
    - ▷ многие другие

2. **КТП подход**: распространяющееся нейтрино – виртуальная частица, все другие частицы описываются волновыми пакетами. Волновая функция нейтрино вычисляется:

- ▷ Grimus, Stockinger 1996 Phys. Rev. D 54 3414;
- ▷ Cardall 2000 Phys. Rev. D 61 073006;
- ▷ D. V. Naumov and V. A. Naumov, J. Phys. G 37 (2010) 105014;
- ▷ Akhmedov and Kopp 2010, JHEP 1004 008
- ▷ многие другие

1. Разработать теорию ковариантного волнового пакета, исследовать свойства.
2. Вычислить амплитуду  $\mathcal{A}_{\alpha\beta}$  “макроскопической” диаграммы, в которой:

- ▶ “источник” и “детектор” нейтрино разделены макроскопическим расстоянием;
- ▶ начальные и конечные частицы описываются волновыми пакетами;
- ▶ нейтрино – виртуальная частица.



3. Вычислить вероятность  $|\mathcal{A}_{\alpha\beta}|^2$ .
4. Произвести макроскопическое усреднение и вычислить число событий  $dN_{\alpha\beta}$ .
5. Обнаружить, что  $dN_{\alpha\beta}$  факторизуется  
 $dN_{\alpha\beta} \propto \Phi_\nu(E_\nu, L) \times P_{\alpha\beta}(E_\nu, L; \sigma_p) \times \sigma(E_\nu)$
6. Исследовать формулу для “вероятности осцилляций”  
 $P_{\alpha\beta}$ .

## ▶ Волновой пакет (ВП)

$$|\psi(t)\rangle = \int \frac{dp}{(2\pi)^3 \sqrt{2E_p}} e^{-iE_p t} \psi_p(p) |p\rangle,$$

где  $\psi_p(p)$  – волновая функция в импульсном представлении с максимумом около **среднего импульса**  $k$  и дисперсией  $\sigma_p$ .

- ▶ Средний 4-импульс – интеграл движения.
- ▶ Волновая функция в координатном представлении

$$\psi_x(t, x) = \int \frac{dp}{(2\pi)^3} e^{-iE_p t + ipx} \psi_p(p).$$

- ▶ В среднем ВП следует классической траектории  

$$\langle \mathbf{x}(t) \rangle = \langle \mathbf{v} \rangle t$$
- ▶ ВП расплывается со временем  $\lim_{t \rightarrow \infty} |\psi_x(t, \mathbf{x})| = 0$
- ▶ Пространственная дисперсия  $\sigma_x^2(t) = \langle \mathbf{x}^2(t) \rangle - \langle \mathbf{x}(t) \rangle^2$  дается

$$\sigma_x^2(t) = \sigma_x^2(0) + (\langle \mathbf{v}^2 \rangle - \langle \mathbf{v} \rangle^2)t^2 = \sigma_x^2(0) + \sigma_v^2 t^2,$$

- ✓ Расплювающийся ВП можно использовать в качестве асимптотического состояния в  $S$ -матричной теории:
- ▶ Для любого  $t$  плотность потока  $\mathbf{j}(t, \mathbf{x})$  убывает быстрее, чем  $1/4\pi|\mathbf{x}|^2$ .

- Интеграл по времени от  $j(t, x)$  (в системе покоя) есть

$$\Phi(x) = \int_0^\infty dt j(t, x) = \frac{1}{4\pi|x|^2}.$$

и преобразуется для лабораторной системы согласно преобразования Лоренца.

- С учетом того, что нормировка  $\langle \psi(t)|\psi(t)\rangle$  конечна и не зависит от времени, расплывающийся ВП можно использовать в качестве асимптотического состояния при больших по модулю (но конечных)  $(t_1, t_2)$  в теории рассеяния с  $S = S(t_1, t_2)$ .

## ▶ Ковариантный ВП

$$|\mathbf{p}, s, x\rangle = \int \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^3 2E_{\mathbf{k}}} e^{+ikx} \phi(\mathbf{k}, \mathbf{p}) |\mathbf{k}, s\rangle,$$

- ▷  $\phi(\mathbf{k}, \mathbf{p})$  – Лоренц-инвариантный форм-фактор, зависящий от дисперсии импульса  $\sigma$ .
- ▷ Волновая функция в импульсном представлении  $\psi_{\mathbf{p}}(\mathbf{p}) = \phi(\mathbf{k}, \mathbf{p}) / \sqrt{2E_{\mathbf{p}}}$ .
- ▷ При  $t = -x_0$  средняя координата ВП есть  $(-x)$
- ▶ В координатном представлении

$$\psi(\mathbf{p}, x) \equiv \psi(\mathbf{p}, x_0, x) = \int \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^3 2E_{\mathbf{k}}} \phi(\mathbf{k}, \mathbf{p}) e^{-ikx}.$$

- ▶ Принцип соответствия и нормировка волнового пакета

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} \phi(\mathbf{k}, \mathbf{p}) = (2\pi)^3 2E_{\mathbf{p}} \delta^3(\mathbf{k} - \mathbf{p}).$$

- ▶ В соответствии с принятой нормировкой ВП  $\psi(\mathbf{p}, x)$  безразмерна.
- ▶ 3D-объем ВП в пространстве:

$$V(\mathbf{p}) \stackrel{\text{def}}{=} \int d\mathbf{x} |\psi(\mathbf{p}, x)|^2 = \frac{V(0)}{\Gamma_p}$$

- ▶ Норма ВП конечна:

$$\langle p, x | p, x \rangle = 2mV_* \simeq 2\langle E_p \rangle V(\mathbf{p})$$

- ▶ Предложена модель релятивистского гауссова пакета

$$\phi_G(k, p) = \frac{2\pi^2}{\sigma^2 K_1(m^2/2\sigma^2)} \exp\left(-\frac{E_k E_p - kp}{2\sigma^2}\right).$$

- ▶ В нерелятивистском случае ( $(|k| + |p|)^2 \ll 4m^2$ )

$$\phi_G(k, p) \sim \exp\left[-\frac{(k - p)^2}{4\sigma^2}\right],$$

форм-фактор, используемый другими авторами.

- ▶ Во всех нейтринных экспериментах участвуют релятивистские частицы → необходимо использовать релятивистские ВП.

- ▶ В координатном пространстве

$$\psi(\mathbf{p}, \mathbf{x}) = \frac{K_1(\zeta m^2/2\sigma^2)}{\zeta K_1(m^2/2\sigma^2)} \stackrel{\text{def}}{=} \psi_G(\mathbf{p}, \mathbf{x}),$$

где  $\zeta = \sqrt{1 - \frac{4\sigma^2}{m^2} [\sigma^2 x^2 - i(px)]}$ .

- ▶ В пренебрежении расплыванием ВП:

$$\psi_G(\mathbf{p}, \mathbf{x}) = \exp \left\{ -i(px) - \frac{\sigma^2}{m^2} [(px)^2 - m^2 x^2] \right\}.$$

## Многопакетные состояния

- ▶ Получены формулы для нормы  $n$ -частичного состояния.
- ▶ Например, норма  $2x$ -частичного состояния есть:

$${}_2\langle p, s, x | p, s, x \rangle_2 = (2mV_*)^2 [1 \pm \delta_{s_1 s_2} \exp(-\sigma^2 |x_1^* - x_2^*|^2)],$$

где знак  $+$  относится к бозонам, а  $-$  к фермионам.

- ▶ Бозе-эйнштейновское притяжение и фермиевское отталкивание, важны лишь при

$$\sigma^2 |x_i^* - x_j^*|^2 \lesssim 1.$$

- ▶ При достаточно больших расстояниях между ВП квантовая статистика не играет роли.

- ▶ Амплитуда с ВП для начальных и конечных состояний:

$$\mathcal{A} = \frac{1}{\mathcal{N}} \langle \{\mathbf{p}_f, x_f\} | \mathbb{S} - 1 | \{\mathbf{p}_i, x_i\} \rangle.$$

- ▶ Норма состояний:

$$\mathcal{N}^2 = \langle \{\mathbf{p}_f, x_f\} | \{\mathbf{p}_f, x_f\} \rangle \cdot \langle \{\mathbf{p}_i, x_i\} | \{\mathbf{p}_i, x_i\} \rangle.$$

- ▶ Микроскопическая вероятность

$$P(\{\mathbf{p}_f, x_f\}, \{\mathbf{p}_i, x_i\}) = |\mathcal{A}|^2$$

- ▶ Макроскопически-усредненная вероятность или число событий:

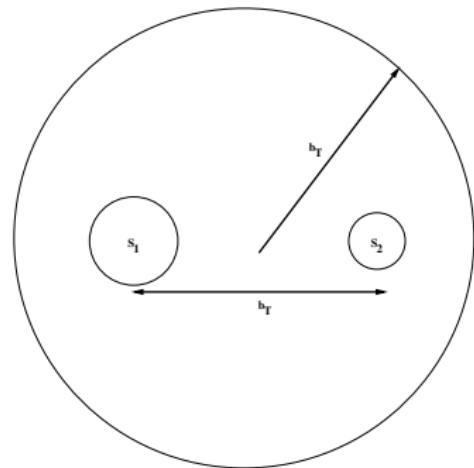
$$dN = \prod_i \frac{dx_i dp_i}{(2\pi)^3} f_i(x_i, p_i, t) \prod_f \frac{dx_f dp_f}{(2\pi)^3} P(\{\mathbf{p}_f, x_f\}, \{\mathbf{p}_i, x_i\})$$

- ▶ Рассеяние двух ВП  $a, b$  с прицельным параметром  
 $b = x_b - x_a$  и  $n = v_{ab}/|v_{ab}|$
- ✓ Число взаимодействий

$$dN = \frac{d\sigma}{S_{ab}} e^{-\pi(\mathbf{b} \times \mathbf{n})^2 / S_{ab}},$$

где

- ▷  $S_{ab} = S_a + S_b$  –  
геометрическая площадь  
ВП в плоскости рассеяния,  
 $S_i = \frac{\pi}{2\sigma_i^2}$ ,
- ▷  $d\sigma$  – плосковолновое  
сечение рассеяния.



## Макроскопическое усреднение

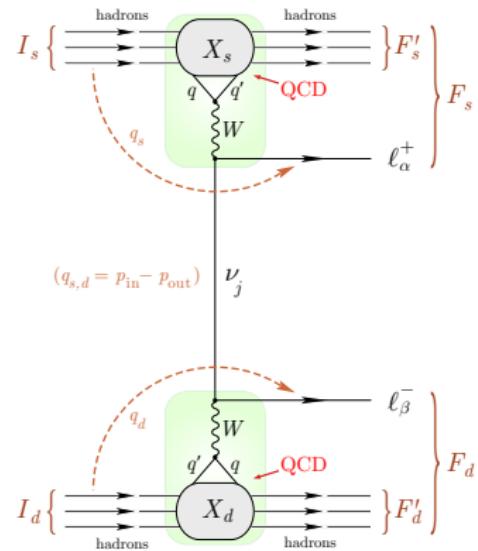
$$\langle dN \rangle = \int d\mathbf{b}_\perp \Phi_{ab} d\sigma \frac{e^{-\pi \mathbf{b}_\perp^2 / S_{ab}}}{S_{ab}} = \Phi_{ab} d\sigma$$

дает хорошо известную связь с плосковолновым приближением.

## ► Рассмотрим класс процессов

$$I_s \oplus I_d \rightarrow F'_s + \ell_\alpha^+ \oplus F'_d + \ell_\beta^-.$$

- Адронная часть амплитуды факторизуется на блоки “источника” и “детектора”.
- В пропагаторе нейтрино
  - ▷  $\int d\mathbf{q}$  вычисляется при помощи теоремы Гrimусса-Стокинджера,
  - ▷  $\int d\mathbf{q}_0$  вычисляется методом перевала.
- Приближение  $m_i = 0$  в матричных элементах.



## Амплитуда

$$\mathcal{A}_{\beta\alpha} = \frac{|\mathbb{V}_s(p_\nu)\mathbb{V}_d(p_\nu)| M_s M_d}{i4\pi^{3/2} \mathcal{N} L} \sum_j V_{\alpha j}^* \tilde{\mathfrak{D}}_j V_{\beta j} e^{-\Omega_j - \Theta_j}.$$

- ▶ Матричные элементы
  - ▷  $M_s$  отвечает  $I_s \rightarrow F'_s + \ell_\alpha^+ + \nu$
  - ▷  $M_d$  отвечает  $\nu + I_d \rightarrow F'_d + \ell_\beta^-$
- ▶ Фаза

$$\Omega_j(T, L) = i(p_j X) + \frac{\tilde{\mathfrak{D}}_j^2}{E_\nu^2} [(p_j X)^2 - m_j^2 X^2], \text{ где } X = X_d - X_s.$$

- ▶  $\Theta_j$  – поправка к фазе,  $L = |X_d - X_s|$ ,  $\mathbb{V}_{s,d}(p_\nu)$  – 4D-объемы перекрытия ВП в источнике и детекторе
- ▶  $\tilde{\mathfrak{D}}_j$  – эффективная дисперсия импульса нейтрино, зависит от кинематики и дисперсией всех частиц

## ▶ Микроскопическая вероятность

$$|\mathcal{A}_{\beta\alpha}|^2 = \int dE_\nu \frac{(2\pi)^4 \delta_s(p_\nu - q_s) V_s |M_s|^2}{\prod_{\kappa \in S} 2E_\kappa V_\kappa} \frac{(2\pi)^4 \delta_d(p_\nu + q_d) V_d |M_d|^2}{\prod_{\kappa \in D} 2E_\kappa V_\kappa} \times \\ \times \frac{\mathfrak{D}}{2\sqrt{2\pi}(2\pi)^3 L^2} \left| \sum_j V_{\alpha j}^* V_{\beta j} e^{-\Omega_j - \Theta_j \frac{1}{1+i\tau_j}} \right|^2,$$

## ▶ 4D-объемы перекрытия ВП в источнике и детекторе

$$V_{s,d} = \int dx \prod_{\kappa \in S,D} |\psi_\kappa(p_\kappa, x_\kappa - x)|^2 = \frac{\pi^2 \exp(-2\mathfrak{S}_{s,d})}{4\sqrt{|\mathfrak{R}_{s,d}|}},$$

▶ Фактор  $\exp(-2\mathfrak{S}_{s,d})$  – геометрическое подавление при ненулевых прицельных параметрах (обобщенных как 4-векторы) рассеивающихся ВП

- ▶ Число событий (макроскопическое усреднение) за время работы  $\tau_s$  источника и детектирования  $\tau_d$ :

$$\frac{dN_{\alpha\beta}}{\tau_d} = \int dx dy dE_\nu \frac{d\Phi_\nu(x, y)}{dE_\nu} d\sigma_\nu(y) \mathcal{P}_{\alpha\beta}(E_\nu, |y - x|),$$

- ▶ где  $\frac{d\Phi_\nu(x, y)}{dE_\nu}$  и  $d\sigma_\nu(y)$  – плотность потока и сечение  $\nu + l_d \rightarrow F'_d + \ell_\beta^-$  в плосковолновом приближении, соответственно.

В режиме стационарного источника  $\tau_s = \infty$ :

$$\mathcal{P}_{\alpha\beta}(E_\nu, L) = \sum_{i,j} \frac{V_{\beta i} V_{\alpha i}^* V_{\alpha j} V_{\beta j}^*}{\sqrt[4]{1 + (L/L_{ij}^d)^2}} \exp \left[ -i(\varphi_{ij} + \varphi_{ij}^d) - \mathcal{A}_{ij}^2 - \mathcal{B}_{ij}^2 \right].$$

В режиме стационарного источника  $\tau_s = \infty$ :

$$\mathcal{P}_{\alpha\beta}(E_\nu, L) = \sum_{i,j} \frac{V_{\beta i} V_{\alpha i}^* V_{\alpha j} V_{\beta j}^*}{\sqrt[4]{1 + (L/L_{ij}^d)^2}} \exp \left[ -i(\varphi_{ij} + \varphi_{ij}^d) - \mathcal{A}_{ij}^2 - \mathcal{B}_{ij}^2 \right].$$

- ▶ Осцилляционная плосковолновая фаза

$$\varphi_{ij} = \frac{2\pi L}{L_{ij}^{\text{osc}}}.$$

- ▶ Длина осцилляций в плосковолновом приближении

$$L_{ij}^{\text{osc}} = \frac{4\pi E_\nu}{\Delta m_{ij}^2}.$$

В режиме стационарного источника  $\tau_s = \infty$ :

$$\mathcal{P}_{\alpha\beta}(E_\nu, L) = \sum_{i,j} \frac{V_{\beta i} V_{\alpha i}^* V_{\alpha j} V_{\beta j}^*}{\sqrt[4]{1 + (L/L_{ij}^d)^2}} \exp \left[ -i(\varphi_{ij} + \varphi_{ij}^d) - \mathcal{A}_{ij}^2 - \mathcal{B}_{ij}^2 \right]$$

- ▶  $\mathcal{A}_{ij}^2 = \frac{1}{1 + (L/L_{ij}^d)^2} \left( \frac{L}{L_{ij}^{coh}} \right)^2$

- ▶ Длина когерентности

$$L_{ij}^{coh} = \frac{2\sqrt{2}E_\nu^2}{\mathfrak{D}\Delta m_{ij}^2}.$$



- ▶ Длина дисперсии

$$L_{ij}^d = \frac{E_\nu^3}{\mathfrak{D}^2\Delta m_{ij}^2}.$$

В режиме стационарного источника  $\tau_s = \infty$ :

$$\mathcal{P}_{\alpha\beta}(E_\nu, L) = \sum_{i,j} \frac{V_{\beta i} V_{\alpha i}^* V_{\alpha j} V_{\beta j}^*}{\sqrt[4]{1 + (L/L_{ij}^d)^2}} \exp \left[ -i(\varphi_{ij} + \varphi_{ij}^d) - \mathcal{A}_{ij}^2 - \boxed{\mathcal{B}_{ij}^2} \right].$$

- ▶  $\mathcal{B}_{ij}^2 = \left( \frac{\Delta E_{ij}}{2\sqrt{2}\mathfrak{D}} \right)^2 = \left( \frac{\pi n}{\sqrt{2}\mathfrak{D} L_{ij}^{\text{osc}}} \right)^2 = \left( \frac{\sqrt{2}\pi\sigma_x n}{L_{ij}^{\text{osc}}} \right)^2$
- ▶ Пространственная дисперсия ВП нейтрино

$$\sigma_x = \frac{1}{2\mathfrak{D}}.$$

В режиме стационарного источника  $\tau_s = \infty$ :

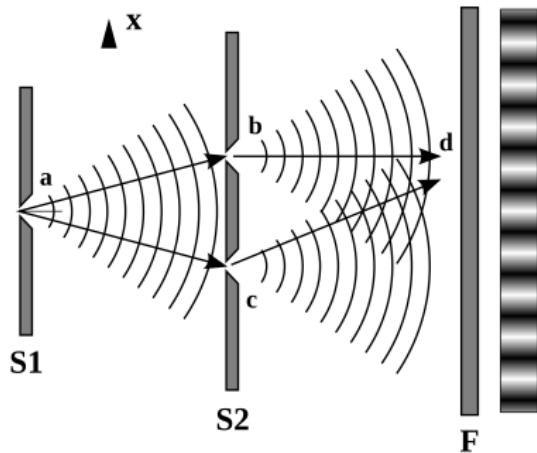
$$\mathcal{P}_{\alpha\beta}(E_\nu, L) = \sum_{i,j} \frac{V_{\beta i} V_{\alpha i}^* V_{\alpha j} V_{\beta j}^*}{\sqrt[4]{1 + (L/L_{ij}^d)^2}} \exp \left[ -i(\varphi_{ij} + \varphi_{ij}^d) - \mathcal{A}_{ij}^2 - \mathcal{B}_{ij}^2 \right].$$

- ▶ Поправка к осцилляционной фазе

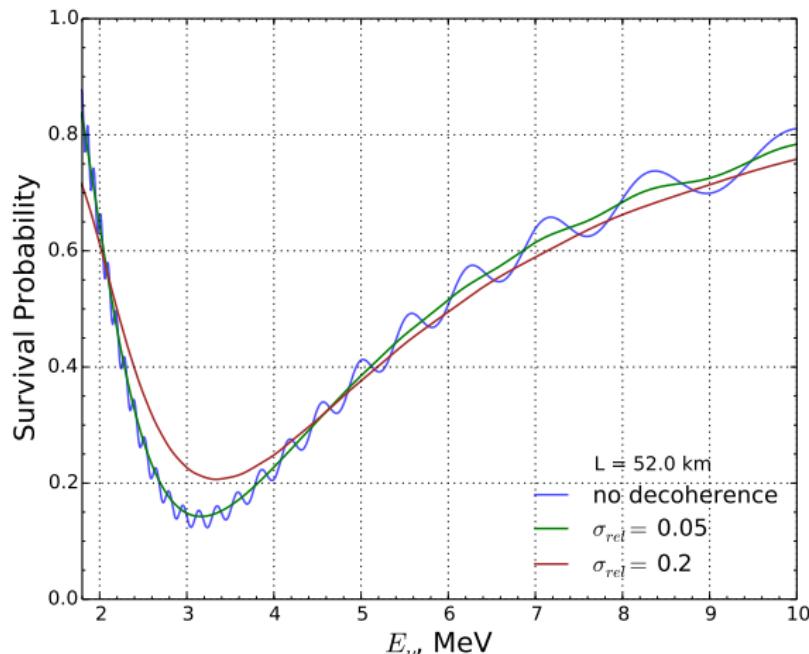
$$\varphi_{ij}^d(L) = -\frac{1}{1 + (L/L_{ij}^d)^2} \left( \frac{L}{L_{ij}^{coh}} \right)^2 \frac{L}{L_{ij}^d} + \frac{1}{2} \arctan \frac{L}{L_{ij}^d}.$$

- ▶  $\mathfrak{D} = 0$  (плоская волна)
  - ▷ Нейтрино рождается/детектируется некогерентно
  - ▷ Нет осцилляций флэйвора
- ▶  $\mathfrak{D} = \infty$  (точечный источник)
  - ▷ Немедленная потеря когерентности
  - ▷ Нет осцилляций флэйвора
- ▶ Когерентность и интерференция теряются при  
 $L > L^{\text{coh}}$  для  $\mathfrak{D} \neq 0, \infty$ 
  - ▷ Астрофизические нейтрино скорее всего некогерентны.

- ▶ Нейтрино рождаются когерентными когда  $\mathfrak{D} \gg \Delta E_{ij}$  как в эксперименте с двойной щелью
- ▶ Заряженные лептоны не осциллируют потому что  $\mathfrak{D} \ll \Delta E_{\ell_\alpha \ell_\beta}$  (см. также E.Akhmedov, JHEP 0709 (2007) 116 )



Потеря когерентности может быть важна для будущих экспериментов  
(Пример: ожидаемый спектр в эксперименте JUNO)



В режиме нестационарного источника  $\tau_s \neq \infty$  (ускорит. эксп.):

$$P_{\alpha\beta}(E_\nu, L) = \frac{1}{S_0} \sum_{ij} V_{\alpha i} V_{\beta j} V_{\alpha j}^* V_{\beta i}^* S_{ij} \exp(i\varphi_{ij} - \mathcal{A}_{ij}^2).$$

► Явный вид

$$S_{ij} = \frac{\exp(-\mathcal{B}_{ij}^2)}{4\tau_d \mathfrak{D}} \sum_{l,l'=1}^2 (-1)^{l+l'+1} \text{lerf} \left[ 2\mathfrak{D} \left( x_l^0 - y_{l'}^0 + \frac{L}{v_{ij}} \right) - i\mathcal{B}_{ij} \right]$$

где

$$\text{lerf}(z) = z \text{erf}(z) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2},$$

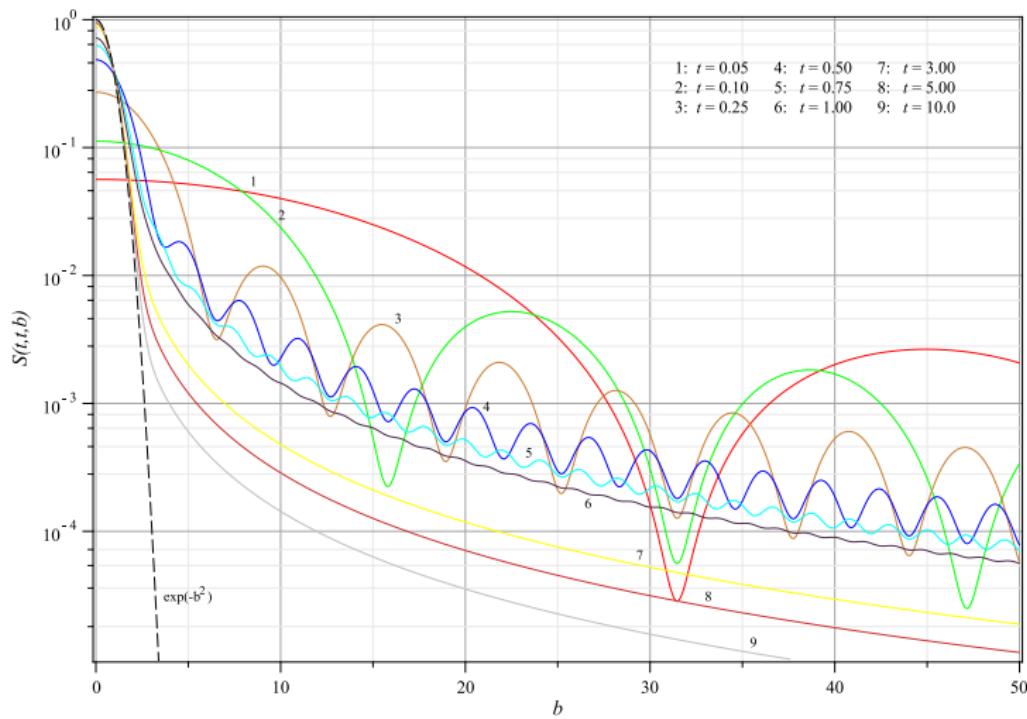
► Диагональная функция не зависит от индекса:

$$S_{ii} = S_0$$

## Несинхронизованные измерения.

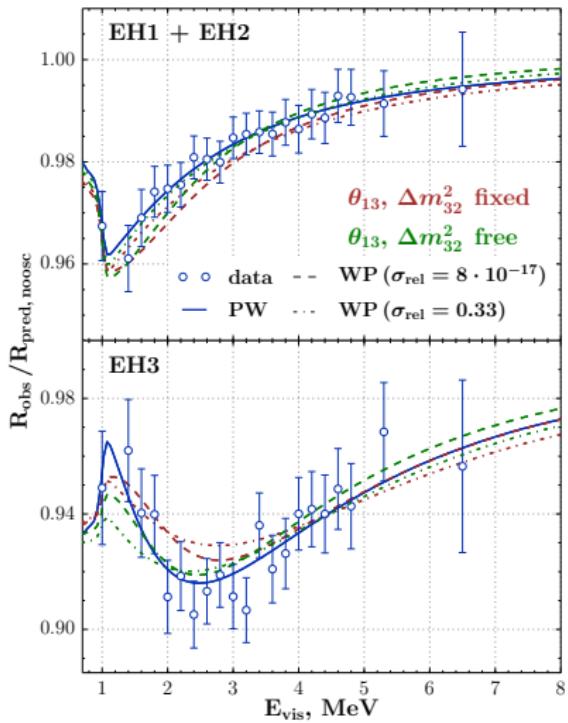
- ▶ Если интервалы времен в источнике  $(x_1^0, x_2^0)$  и в детекторе  $(y_1^0, y_2^0)$  не синхронизованы, то:
  - ▷ фактор  $S_{ij} \rightarrow 0$ .

# Синхронизированные измерения.



- ▶ Измерение энергии-импульса при конечных временах эквивалентна внесению дополнительной неопределенности в их определение,
  - ▷ нейтринные состояния становятся более когерентными.
- ▶ Ускорительные эксперименты имеют дополнительную чувствительность к дисперсии ( $\mathcal{D}$ ) волновой функции нейтрино .

- ▶ Вероятность осцилляций в модели волнового пакета зависит от  $\sigma_{\text{rel}} = \mathfrak{D}/E_\nu$
- ▶ Оценки осцилляционных параметров в моделях волнового пакета и плосковолновой модели могут отличаться



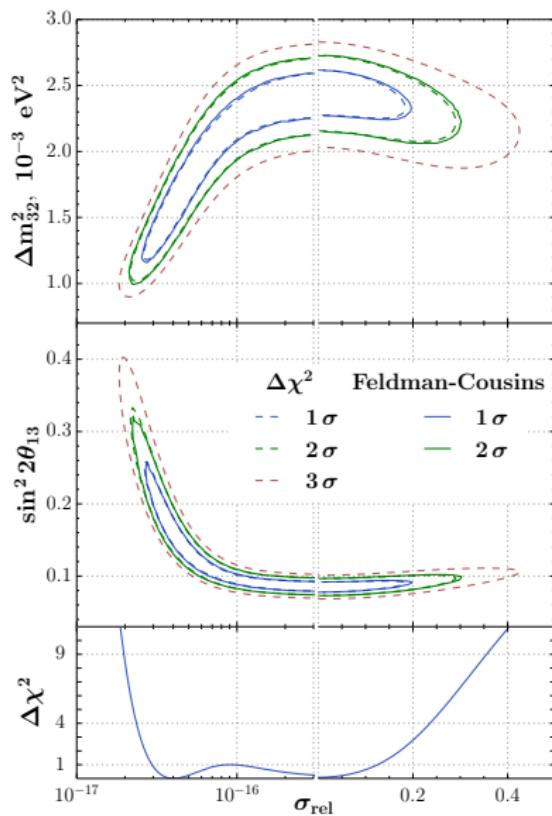
► Полученные пределы

$$2.38 \cdot 10^{-17} < \sigma_{\text{rel}} < 0.23$$

► с учетом размеров  
реактора/детектора:

$$10^{-11} \text{ cm} \lesssim \sigma_x \lesssim 2m.$$

► Эти результаты  
обеспечивают  
несмешенную оценку  
 $\sin^2 2\theta_{13}$  и  $\Delta m^2_{32}$  в  
плосковолновой модели



Измерение  $\theta_{13}$ ,  $\Delta m^2_{32}$  и ковариантная квантово-полевая теория нейтринных осцилляций.

└ Измерение  $\theta_{13}$  и  $\Delta m^2_{32}$  в эксперименте Daya Bay

└ Антинейтрино от реактора

Реактор как источник  $\bar{\nu}_e$ :

► Интенсивный:

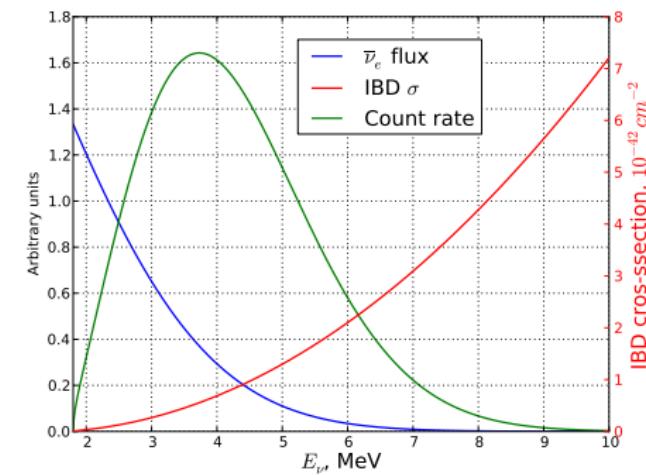
- ▷  $\sim 10^{20} \bar{\nu}_e / \text{s}/\text{GW}_{\text{th}}$ .
- ▷  $\sim 6 \bar{\nu}_e$  на деление

► Один флагман:  $\bar{\nu}_e$

► Бесплатно

Детектирование:

► Реакция обратного  $\beta$ -распада (IBD)  
 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$



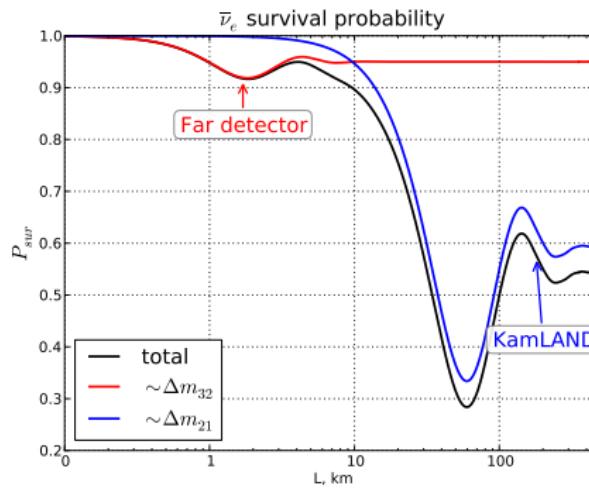
Осцилляции

- ▷ Эффект вещества пренебрежим
- ▷ Нет зависимости от  $\delta_{\text{CP}}$

Измерение  $\theta_{13}$ ,  $\Delta m_{32}^2$  и ковариантная квантово-полевая теория нейтринных осцилляций.

└ Измерение  $\theta_{13}$  и  $\Delta m_{32}^2$  в эксперименте Daya Bay

└ Антинейтрино от реактора



$$P_{dis} = \sin^2 2\theta_{13} (\sin^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{32} + \cos^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{31})$$

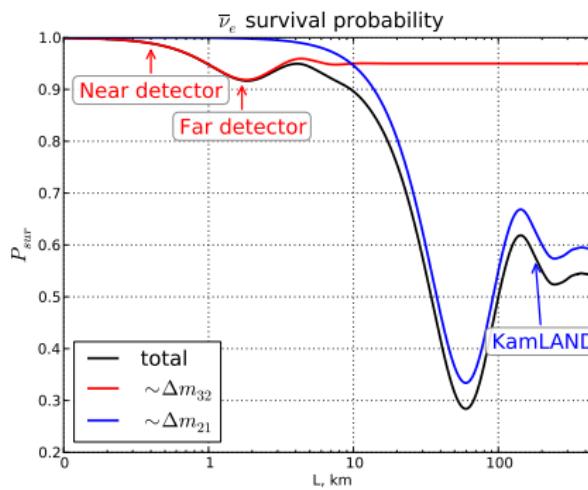
$$+ \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \Delta_{21}$$

$$\Delta_{jk} = 1267 \cdot \frac{\Delta m_{jk}^2}{\text{eV}^2} \cdot \frac{L}{E} \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{km}} \right]$$

Измерение  $\theta_{13}$ ,  $\Delta m^2_{32}$  и ковариантная квантово-полевая теория нейтринных осцилляций.

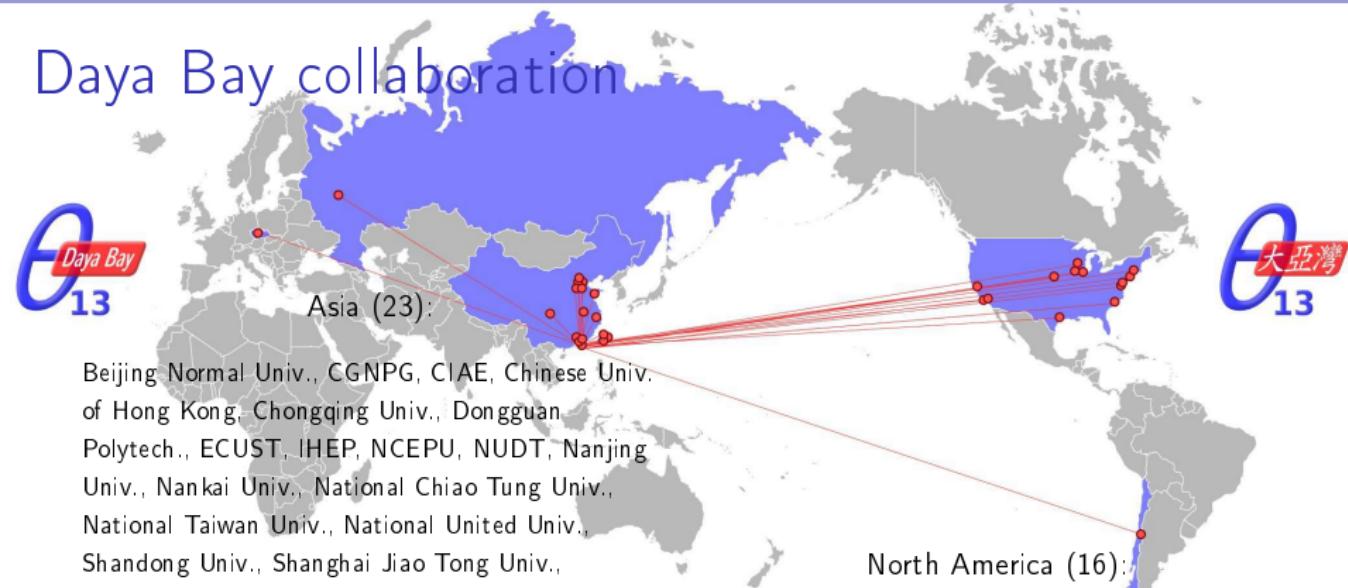
└ Измерение  $\theta_{13}$  и  $\Delta m^2_{32}$  в эксперименте Daya Bay

└ Антинейтрино от реактора



$$\frac{N_f}{N_n} = \left( \frac{N_{p,f}}{N_{p,n}} \right) \left( \frac{L_n}{L_f} \right)^2 \left( \frac{\epsilon_f}{\epsilon_n} \right) \left( \frac{P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(E, L_f)}{P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(E, L_n)} \right)$$

## Daya Bay collaboration



Beijing Normal Univ., CGNPG, CIAE, Chinese Univ.  
of Hong Kong, Chongqing Univ., Dongguan  
Polytech., ECUST, IHEP, NCEPU, NUDT, Nanjing  
Univ., Nankai Univ., National Chiao Tung Univ.,  
National Taiwan Univ., National United Univ.,  
Shandong Univ., Shanghai Jiao Tong Univ.,  
Shenzhen Univ., Tsinghua Univ., USTC, Univ. of  
Hong Kong., Xi'an Jiaotong Univ., Zhongshan Univ.

Europe (2) and Sourtth America (1):

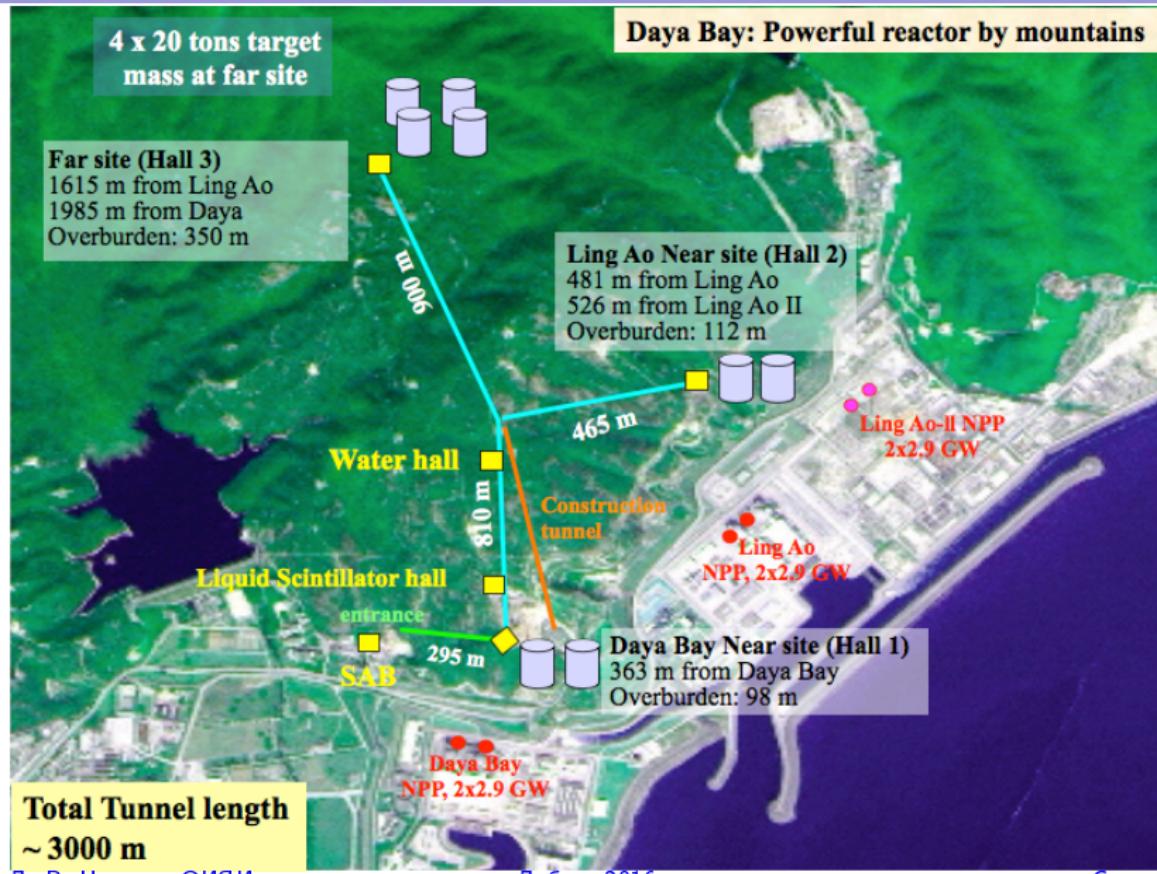
Charles University, **Joint Institute for Nuclear  
Research**, Catholic Univ. of Chile.

Brookhaven Natl Lab, Illinois Institute of  
Technology, Iowa State, Lawrence Berkeley Natl  
Lab, Princeton, Rensselaer Polytech., Sienna  
College, Temple Univ., UC Berkeley, Univ. of  
Cincinnati, Univ. of Houston, UIUC, Univ.  
Wisconsin, Virginia Tech, William & Mary, Yale.

Измерение  $\theta_{13}$ ,  $\Delta m^2_{32}$  и ковариантная квантово-полевая теория нейтринных осцилляций.

└ Измерение  $\theta_{13}$  и  $\Delta m^2_{32}$  в эксперименте Daya Bay

└ Эксперимент Daya Bay



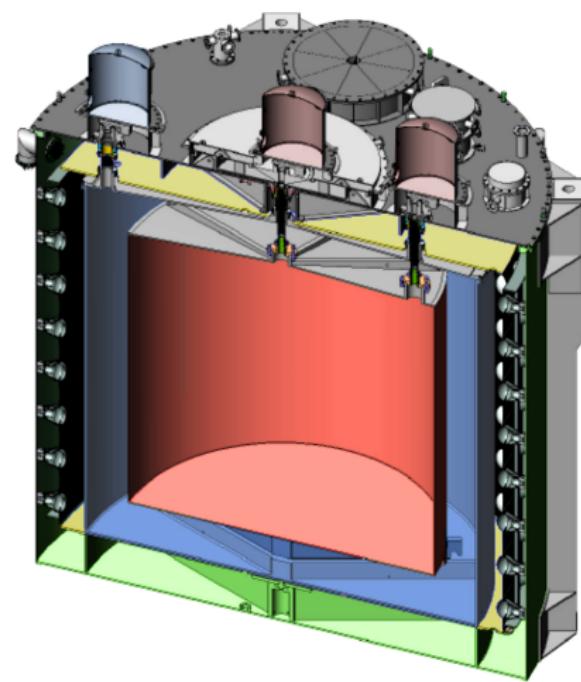
# Антинейтринный детектор

3-зонный антинейтринный детектор:

Внутрення зона      20 t    Gd-ЖС

Средняя зона      20 t    ЖС

Внешняя зона      40 t    Минеральное масло



# Антинейтринный детектор

3-зонный антинейтринный детектор:

Внутрення зона      20 t    Gd-ЖС

Средняя зона      20 t    ЖС

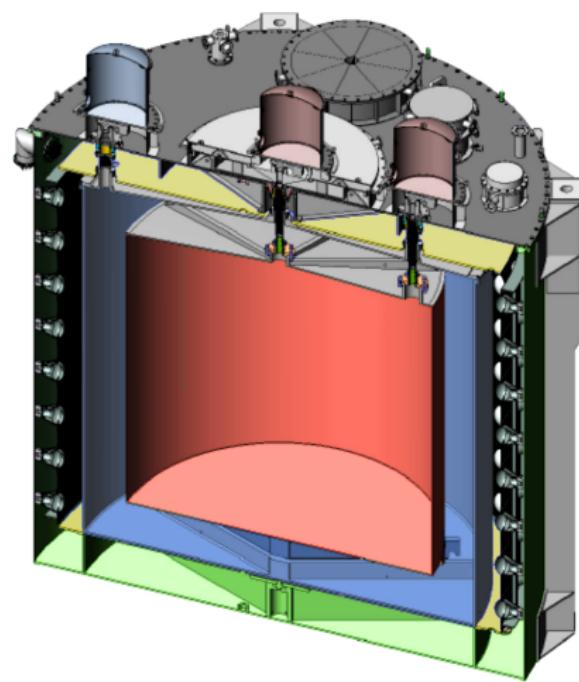
Внешняя зона      40 t    Минеральное масло

Внутрення зона:

- Мишень  $\bar{\nu}_e$ .
- Задает довер. объем.
- Содержится внутри акриловой емкости.

Обратный  $\beta$ -распад:

- $\bar{\nu}_e + p \longrightarrow e^+ + n$
- $e^+ + e^- \longrightarrow 2\gamma$
- $n + Gd \longrightarrow Gd + \sum \gamma$  (8 MeV)
- Первичная энергия  $\approx E_\nu - 0.8\text{MeV}$
- Задержанная энергия:  $\sim 8\text{ MeV}$



# Антинейтринный детектор

З-зонный антинейтринный детектор:

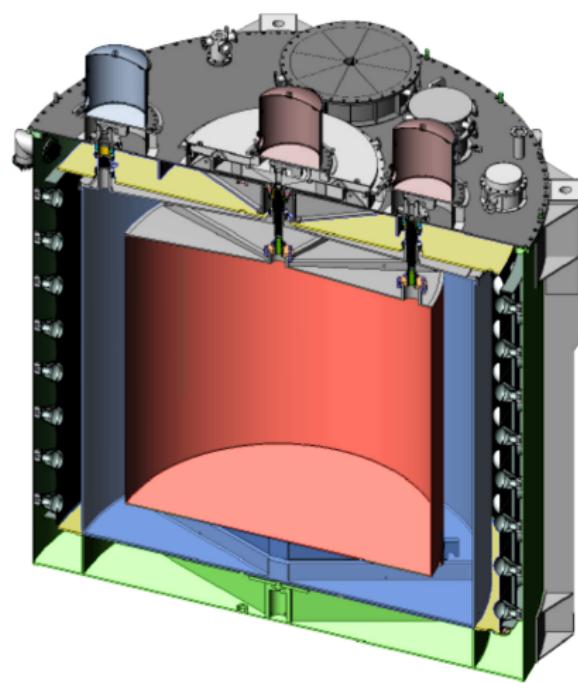
Внутрення зона      20 t    Gd-ЖС

Средняя зона      20 t    ЖС

Внешняя зона      40 t    Минеральное масло

Средняя зона:

- ▶  $\gamma$ -захватчик.
- ▶ конвертирует  $\gamma$  из  $\bar{\nu}_e$  вз-й во внутреннем объеме.
- ▶ Содержится внутри акриловой емкости.



# Антинейтринный детектор

З-зонный антинейтринный детектор:

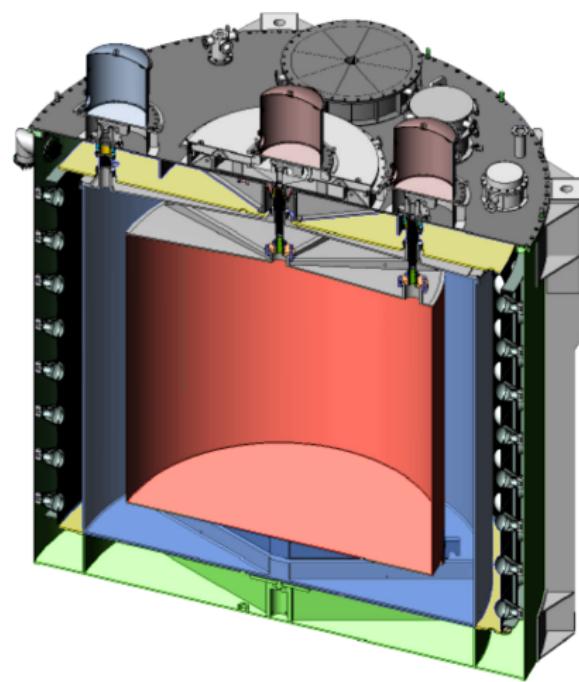
Внутрення зона      20 t   Gd-ЖС

Средняя зона      20 t   ЖС

Внешняя зона      40 t   Минеральное масло

Внешняя зона:

- ▶ Буфер от фона.
- ▶ Подавляет внешнюю радиоактивность (от ФЭУ, стали).
- ▶ Подавляет сцинтилляцию во внешней зоне.

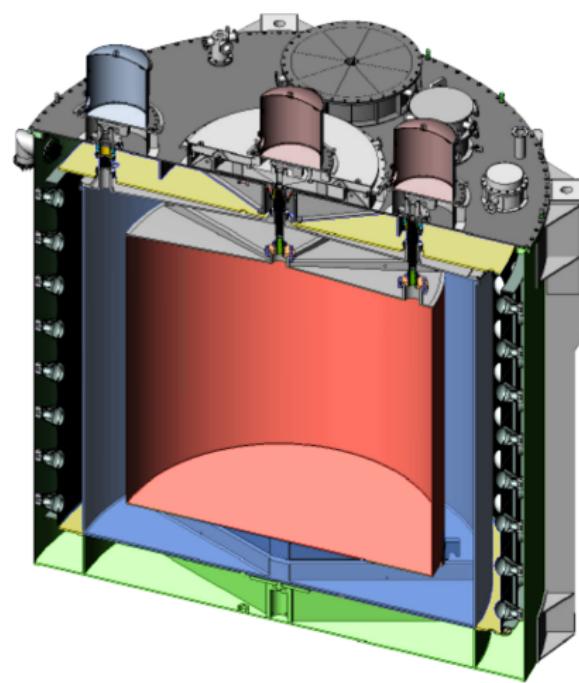


# Антинейтринный детектор

3-зонный антинейтринный детектор:

Внутрення зона	20 t	Gd-ЖС
Средняя зона	20 t	ЖС
Внешняя зона	40 t	Минеральное масло
ФЭУ	192	8" Hamamatsu
Защита		Acryl
Калиб. ФЭУ	6	2" Hamamatsu
Отражатель	2	ESR film
ACU	3	

- $\sim 163$  р. е./MeV.
- Разрешение энергии:  $(7.5/\sqrt{E} + 0.9)\%$ .



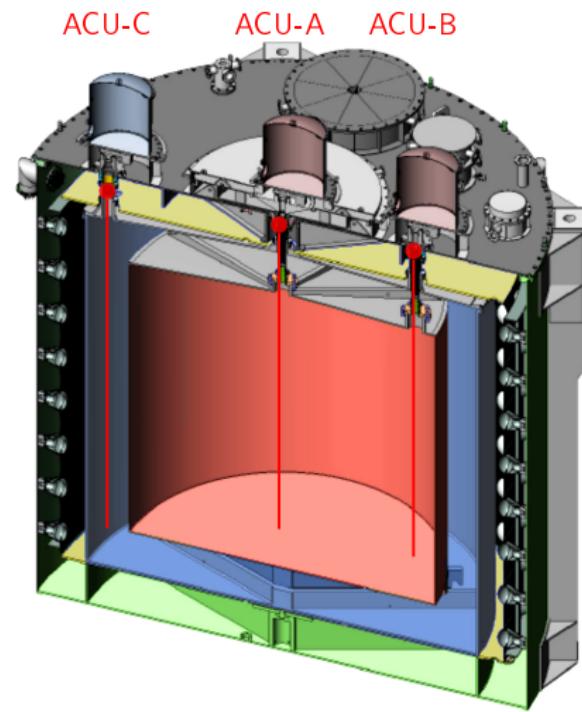
## Калибровка

Три автоматические калибровочные станции:

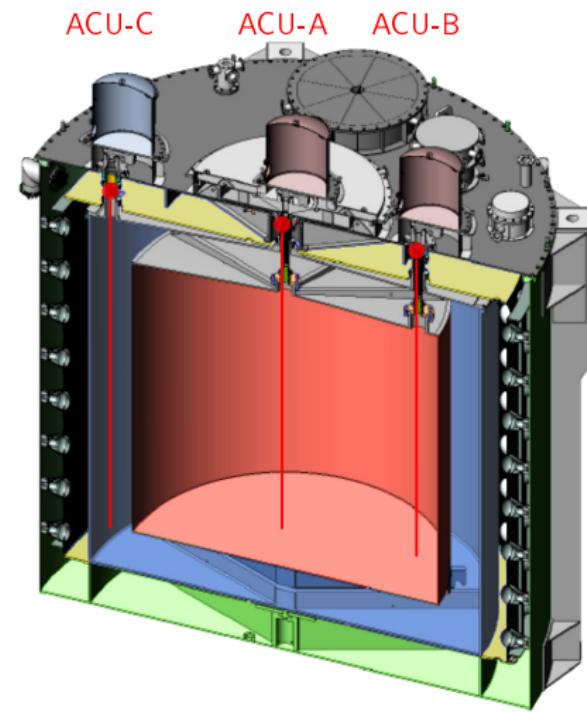
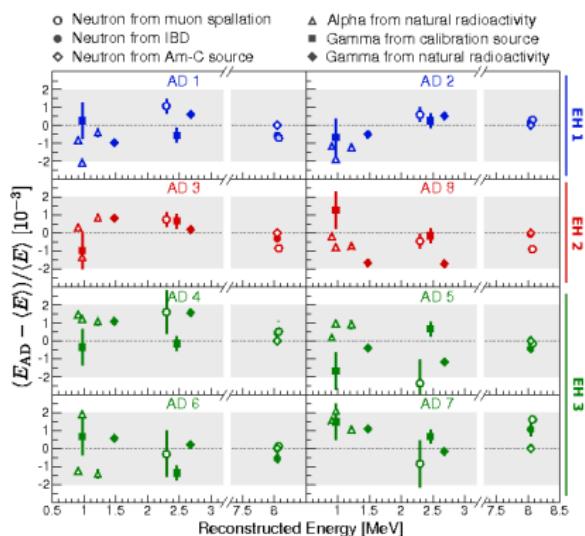
- ▶ Центр мишени (ACU-A):  
неоднородность, non-uniformity,  
энергетическая шкала, нелинейность.
- ▶ Край мишени (ACU-B):  
неоднородность, эффективность.
- ▶ Гамма захватчик (ACU-C):  
неоднородность, эффективность.

ACU оборудование:

- ▶ Светодиод:
- Время ФЭУ, усиление и относит. QE.
- ▶  $^{241}\text{Am}$ - $^{13}\text{C}$  нейтронный источник:  
время захвата нейтрона.
- ▶  $^{68}\text{Ge}$   $\gamma$  источник ( $2 \times 511 \text{ keV}$ ):  
энергетический порог, нелинейность.
- ▶  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  source ( $1.17 + 1.33 \text{ MeV}$ ):  
энергетическая шкала и отклик.



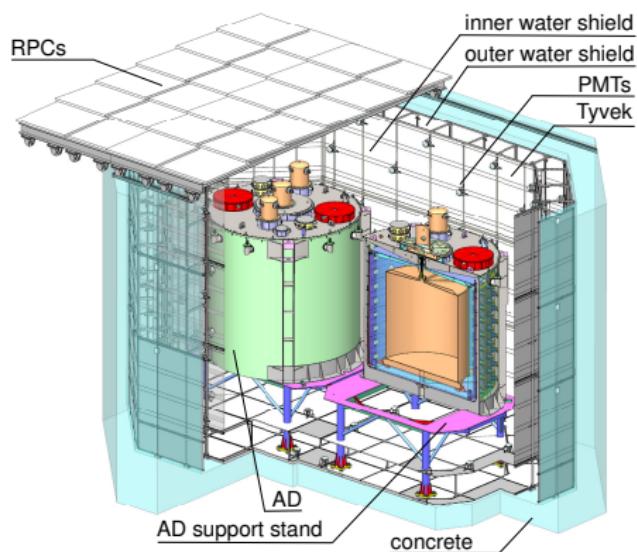
# Калибровка



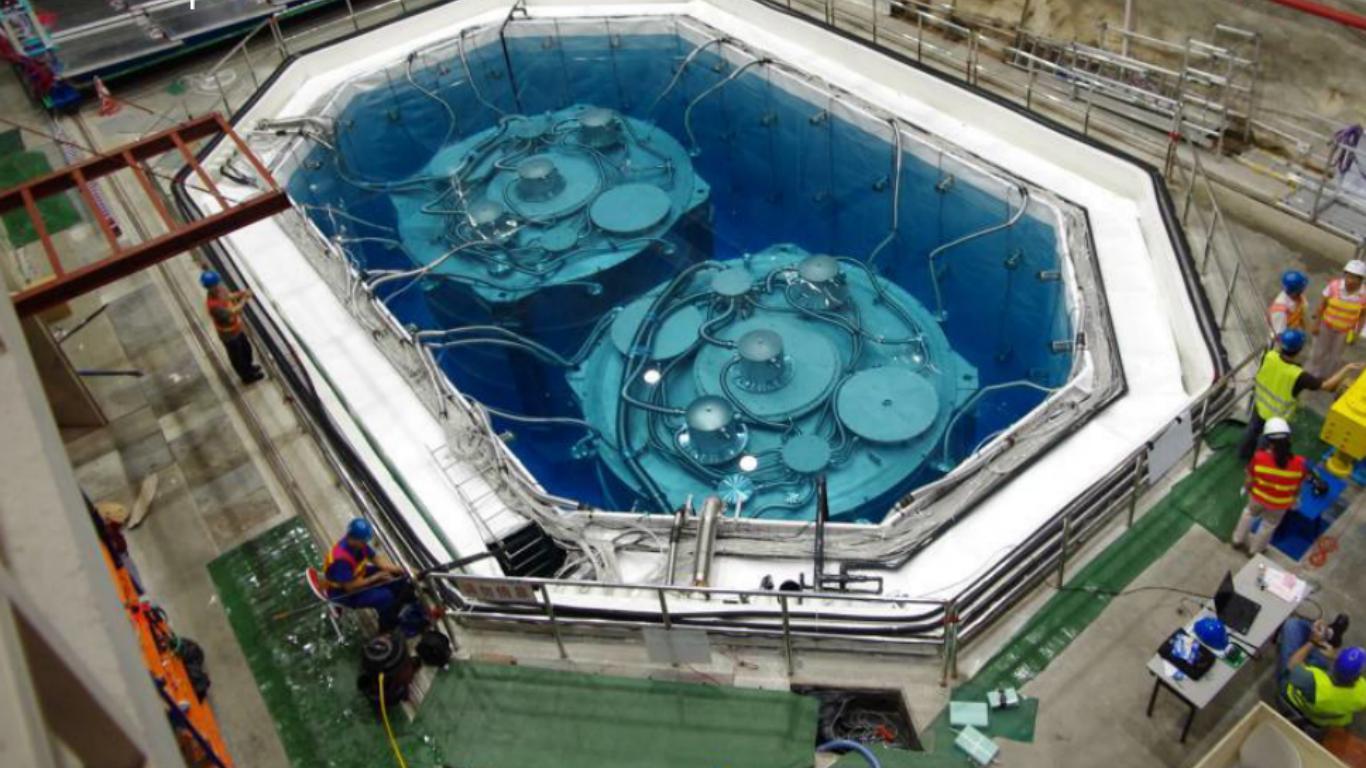
Относительная неопределенность  
энергетической шкалы в pGd  
анализе: 0.2%.

## Мюонная вето система

- ▶ Водный бассейн:
  - ▶ Защита от внешней радиоактивности и космогенного фона.
  - ▶ Черенковский мюонный трекер.
  - ▶ 288 8" ФЭУ в каждом ближнем холле.
  - ▶ 384 8" ФЭУ в дальнем холле.
  - ▶ Внешняя водная защита (1 м).
  - ▶ Внутрення водная защита (>2.5 м).
- ▶ 4-слойное вето из РПК:
  - ▶ Мюонный трекер.
  - ▶ 54 модуля в каждом ближнем холле.
  - ▶ 81 модуля в каждом дальнем холле.
- ▶ Требуемая эффективность 99.5% с неопределенность < 0.25%.



## Экспериментальный холл 1



Измерение  $\theta_{13}$ ,  $\Delta m^2_{32}$  и ковариантная квантово-полевая теория нейтринных осцилляций.

└ Измерение  $\theta_{13}$  и  $\Delta m^2_{32}$  в эксперименте Daya Bay

└ Эксперимент Daya Bay

## Экспериментальный холл 3

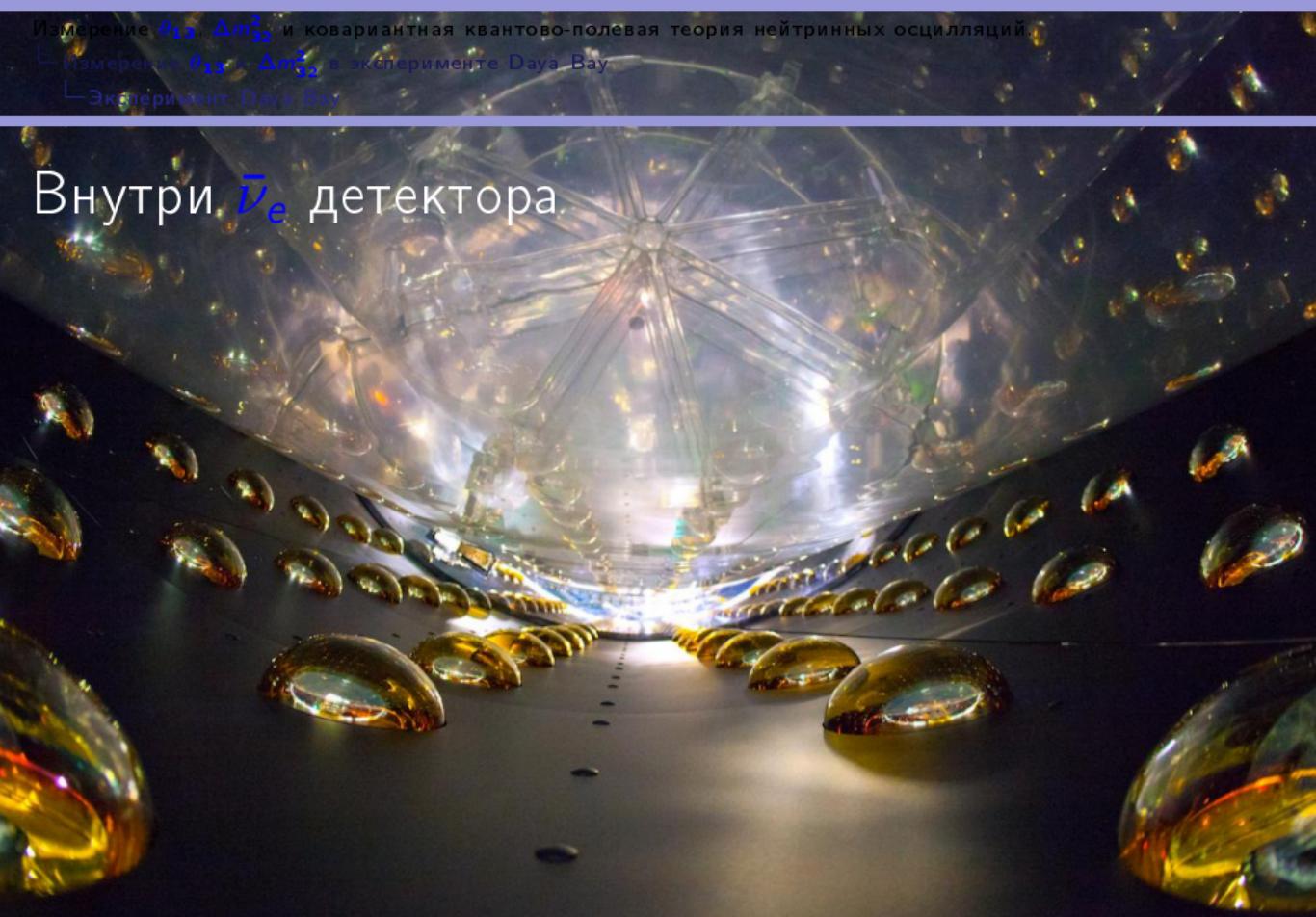


Измерение  $\theta_{13}$ ,  $\Delta m^2_{32}$  и ковариантная квантово-полевая теория нейтринных осцилляций.

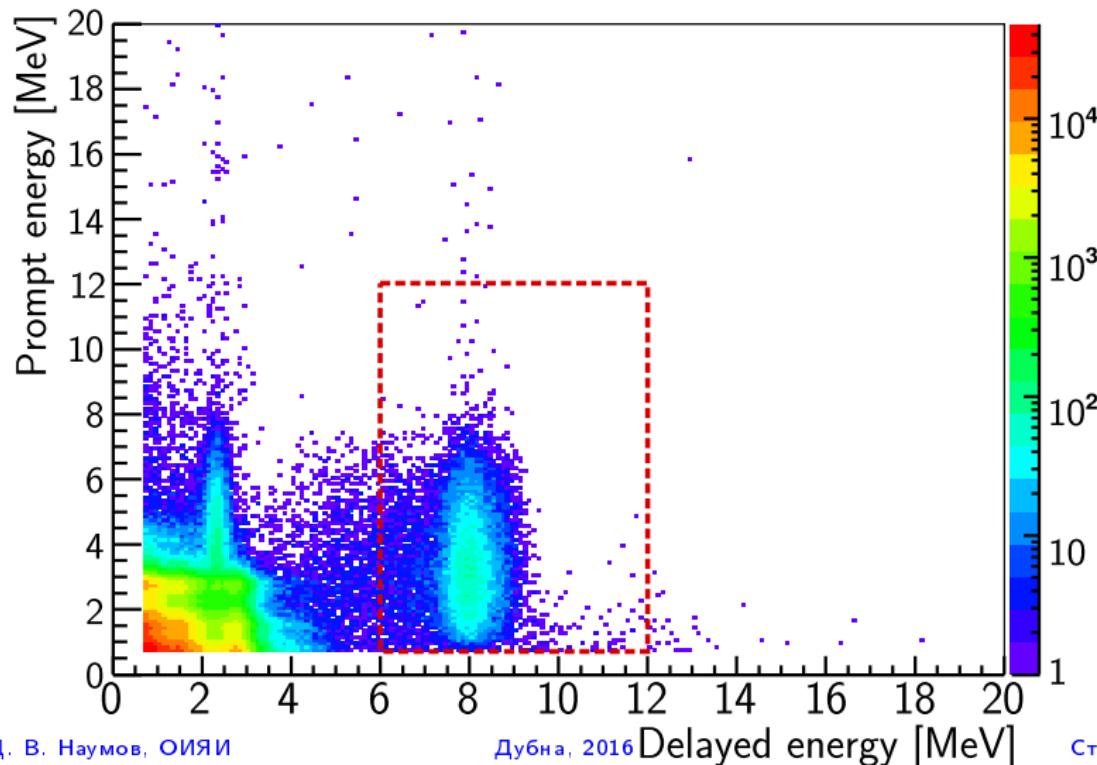
└ Измерение  $\theta_{13}$  +  $\Delta m^2_{32}$  в эксперименте Daya Bay

└ Эксперимент Daya Bay

Внутри  $\bar{\nu}_e$  детектора.



## Оценка фона

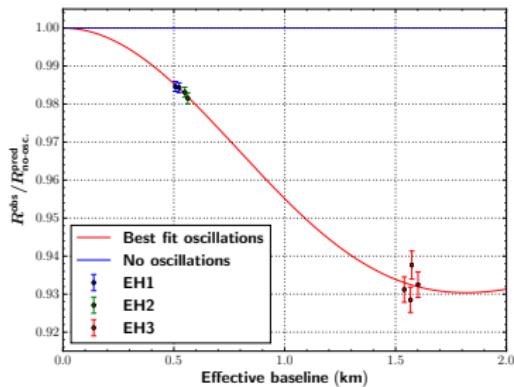


# Оценка фона

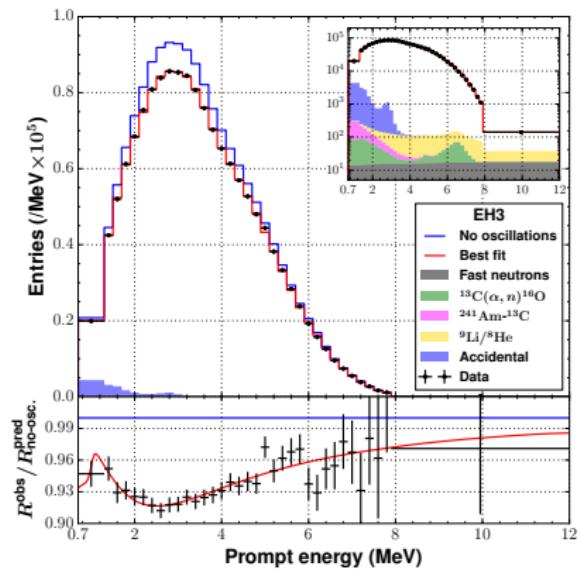
	Ближние холлы B/S, %	Дальний холл B/S, %	Неопр.	Метод оценки
Случайные совпадения	1.4	2.3	~ 1%	Некоррелированные сигналы
${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$	0.4	0.4	50%	Измерено с событиями после $\mu$
Быстрые нейтроны	0.1	0.1	50%	Измерено с таггированными $\mu$
${}^{241}\text{Am}-{}^{13}\text{C}$	0.03	0.2	50%	MC, проверенное на одиночных $\gamma$ и интенсивном источнике ${}^{241}\text{Am}-{}^{13}\text{C}$
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$	0.01	0.1	50%	Вычислено из измеренной радиоактивности

└ Измерение  $\theta_{13}$  и  $\Delta m^2_{32}$  в эксперименте Daya Bay

└ Результаты. Сравнение наблюдений в ближнем и дальнем холлах

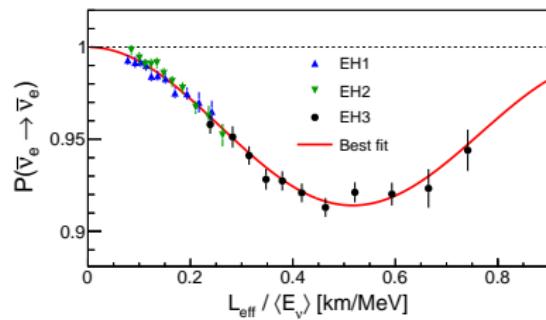
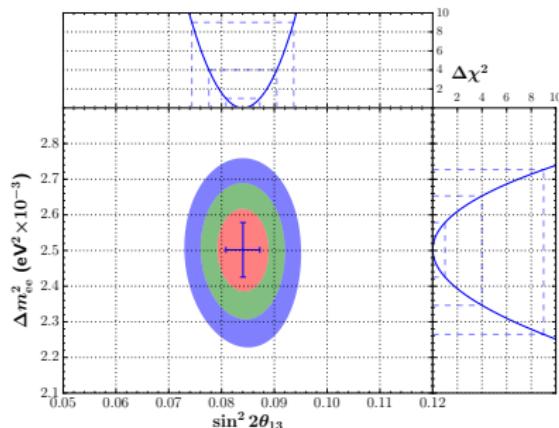


Дефицит числа событий и  
относительное  
изменение спектра  
согласуются с  
осцилляциями нейтрино.



└ Измерение  $\theta_{13}$  и  $\Delta m^2_{32}$  в эксперименте Daya Bay

## └ Результаты осцилляционного анализа



$$\sin^2 2\theta_{13} = (8.41 \pm 0.27(\text{stat.}) \pm 0.19(\text{syst.})) \times 10^{-2}$$

$$|\Delta m^2_{ee}| = (2.50 \pm 0.06(\text{stat.}) \pm 0.06(\text{syst.})) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

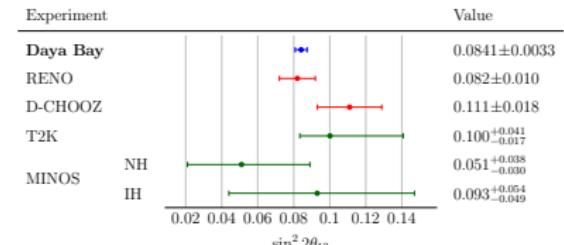
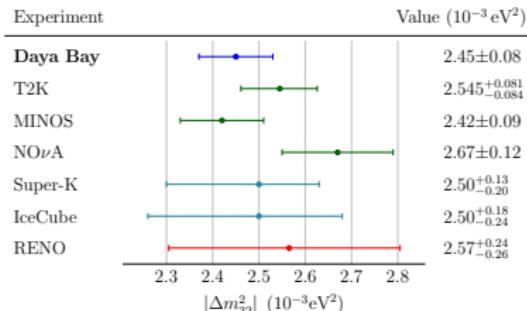
$$\chi^2/\text{NDF} = 232.6/263$$

- ▶ Наиболее точное измерение  $\sin^2 2\theta_{13}$ . Отличие от нуля  $> 25\sigma$
- ▶ Наиболее точное измерение  $\Delta m_{ee}^2$
- ▶ Нормальная иерархия:

$$\Delta m_{32}^2 = (2.45 \pm 0.06(\text{stat.}) \pm 0.06(\text{syst.})) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

- ▶ Обратная иерархия:

$$\Delta m_{32}^2 = (-2.55 \pm 0.06(\text{stat.}) \pm 0.06(\text{syst.})) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$



- ▶ 217 дней набора данных (6AD период)
- ▶ Результаты согласуются в разных детекторах
- ▶ Результат согласуется с мировым средним
- ▶ Daya Bay согласуется с аномалией

### Huber+Mueller

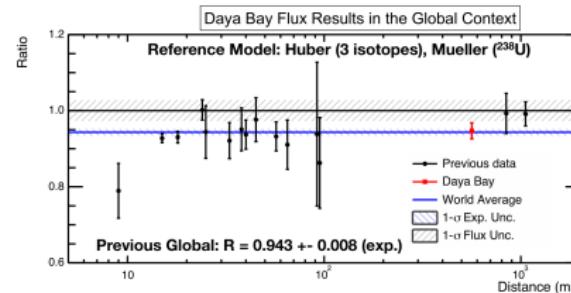
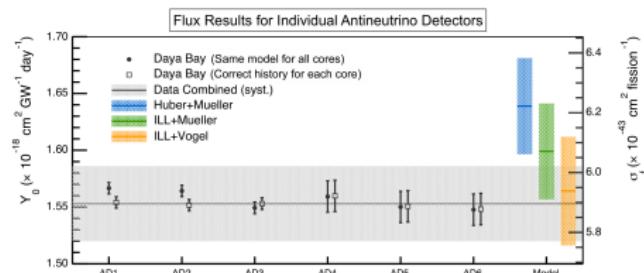
Данные/модель:  $0.946 \pm 0.022$

### ILL+Vogel

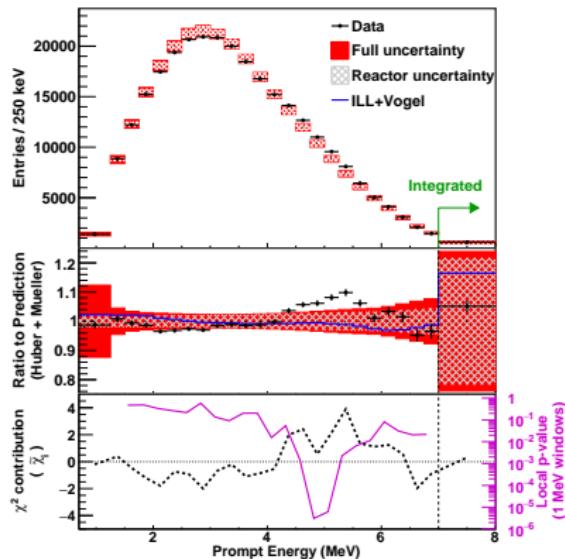
Данные/модель:  $0.991 \pm 0.023$

### Huber+Mueller (global)

Данные/модель:  
 $0.943 \pm 0.008$  (exp)  $\pm 0.025$  (model)

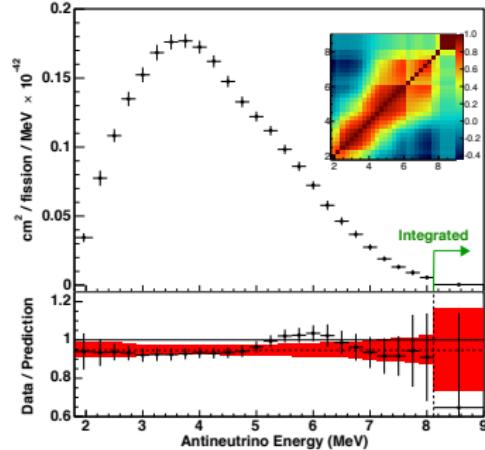


## Наблюдаемый спектр позитронов



- Пик в области 5–6 MeV.
- Согласие с другими экспериментами.
- Наблюдаются для Huber+Mueller/ILL+Vogel моделей.

## Извлеченный спектр антинейтрино



- Глобальная значимость:  $2.6\sigma$ .
- Локальная значимость:  $4\sigma$ .

▶ Предмет исследования:

Смешивание лептонов

▶ Объект исследования:

Осцилляции нейтрино

▶ Цель:

Разработка квантово-полевой теории нейтринных осцилляций в модели релятивистского волнового пакета, прецизионное измерение  $\sin^2 2\theta_{13}$  и  $\Delta m^2_{32}$  в эксперименте Daya Bay.

▶ Актуальность:

- ▶ Величина угла смешивания  $\theta_{13}$  была неизвестна до 2012
- ▶ Плосковолновая теория нейтринных осцилляций неполна и не самосогласована

1. Разработка теории релятивистского волнового пакета. Исследование свойств релятивистского волнового пакета. Вычисление сечения рассеяния релятивистских волновых пакетов в квантовой теории поля.
2. Доказательство того, что пространственная дисперсия волнового пакета в плоскости, перпендикулярной направлению его движения, приводит к подавлению вида  $1/4\pi|x|^2$  плотности потока, проинтегрированного по времени, на расстоянии  $|x|$  от источника рождения волнового пакета.

3. Вычисление вероятности процесса, нарушающего лептонное число, с релятивистскими волновыми пакетами, соответствующими частицам в начальном и конечном состояниях, нейтрино в виртуальном состоянии, источником и детектором нейтрино, разделенными макроскопическим расстоянием.
4. Разработка метода макроскопического усреднения квантово-полевой вероятности процесса с участием волновых пакетов.
5. Вычисление формулы для вероятности осцилляций нейтрино в модели релятивистского волнового пакета с учетом пространственной дисперсии эффективного волнового пакета нейтрино и конечных интервалов активности “источника” и “детектора”.

6. Разработка методики измерения осцилляционных параметров в реакторном эксперименте и создание комплекса компьютерных программ анализа экспериментальных данных эксперимента Daya Bay.
7. Измерение параметра смещивания нейтрино  $\sin^2 2\theta_{13}$ .
8. Измерение разницы квадратов масс  $\Delta m^2_{32}$ .
9. Измерение энергетического спектра реакторных антинейтрино.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 22 печатных изданиях, 18 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 – в тезисах докладов, 1 – в архиве.

[1] F. P. An et al.

Independent measurement of the neutrino mixing angle  $\theta_{13}$  via neutron capture on hydrogen at Daya Bay.  
*Phys. Rev.*, D90(7):071101, 2014.

[2] F. P. An et al.

New Measurement of Antineutrino Oscillation with the Full Detector Configuration at Daya Bay.  
*Phys. Rev. Lett.*, 115(11):111802, 2015.

- [3] F. P. An et al.  
The muon system of the Daya Bay Reactor antineutrino experiment.  
*Nucl. Instrum. Meth.*, A773:8–20, 2015.
- [4] F. P. An et al.  
New measurement of  $\theta_{13}$  via neutron capture on hydrogen at Daya Bay.  
*Phys. Rev.*, D93:072011, 2016.
- [5] F. P. An et al.  
The Detector System of The Daya Bay Reactor Neutrino Experiment.  
*Nucl. Instrum. Meth.*, A811:133–161, 2016.

[6] Feng Peng An et al.

Improved Measurement of the Reactor Antineutrino Flux  
and Spectrum at Daya Bay.

2016.

[7] Feng Peng An et al.

Measurement of electron antineutrino oscillation based on  
1230 days of operation of the Daya Bay experiment.

2016.

[8] Feng Peng An et al.

Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and  
Spectrum at Daya Bay.

*Phys. Rev. Lett.*, 116(6):061801, 2016.

- [9] F.P. An et al.  
Improved Measurement of Electron Antineutrino  
Disappearance at Daya Bay.  
*Chin.Phys.*, C37:011001, 2013.
- [10] F.P. An et al.  
Spectral measurement of electron antineutrino oscillation  
amplitude and frequency at Daya Bay.  
*Phys.Rev.Lett.*, 112:061801, 2014.
- [11] V. A. Bednyakov, D. V. Naumov, and O. Yu Smirnov.  
Neutrino physics and JINR.  
*Phys. Usp.*, 59(3):225–253, 2016.

[12] An F.P. et al.

A side-by-side comparison of Daya Bay antineutrino detectors.

*Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*  
685:78–97, 2012.

[13] An F.P. et al.

Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay.

*Phys.Rev.Lett.*, 108:171803, 2012.

[14] Xinheng Guo et al.

A Precision measurement of the neutrino mixing angle  $\theta_{13}$  using reactor antineutrinos at Daya-Bay.

2007.

[15] Dmitry V. Naumov.

Recent results from Daya Bay experiment.

*EPJ Web Conf.*, 95:04043, 2015.

[16] Dmitry V. Naumov.

Neutrino physics program at the jinr.

In *Proc. of the 4th South Africa - JINR Symposium. Few to Many Body Systems: Models, Methods and Applications*, edited by F. Simkovic and conveners of session, 2016.

[17] Dmitry V. Naumov and Vadim A. Naumov.

Relativistic wave packets in a field theoretical approach to neutrino oscillations.

*Russ.Phys.J.*, 53:549–574, 2010.

[18] D.V. Naumov.

Introduction to neutrino physics.

*Phys.Part.Nucl.Lett.*, 8:717–742, 2011.

[19] D.V. Naumov.

A short review of most interesting recent results in neutrino physics.

*Phys.Part.Nucl.Lett.*, 9:691–695, 2012.

[20] D.V. Naumov.

On the theory of wave packets.

*Phys.Part.Nucl.Lett.*, 10:642–650, 2013.

[21] D.V. Naumov and V.A. Naumov.

A Diagrammatic treatment of neutrino oscillations.

*J.Phys.G*, G37:105014, 2010.

[22] K.V. Tsang, F.P. An, Q. An, J.Z. Bai, A.B. Balantekin,  
et al.

Results from the Daya Bay Reactor Neutrino Experiment.  
*Nucl.Phys.Proc.Suppl.*, 246-247:18–22, 2014.

Основные результаты работы докладывались на международных конференциях:

1. **Latest Results from the Daya Bay Reactor Neutrino Experiment**. New Trends in High-Energy Physics, 2-8 October 2016, Budva, Becici, Montenegro (пленарный доклад);
2. **Neutrino Physics with Nuclear Reactors**. QUARKS-2016 19th International Seminar on High Energy Physics, Pushkin, Russia, 29 May - 4 June, 2016 (пленарный доклад);
3. **Neutrino Physics with Nuclear Reactors**. Международная Сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН, 12 - 15 апреля, 2016, ОИЯИ, Дубна (пленарный доклад);

4. **Neutrino Oscillations in QFT with relativistic wave packets.** Международная Сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН, 12 - 15 апреля, 2016, ОИЯИ, Дубна (доклад на параллельной сессии);
5. **Neutrino Physics program at the JINR.** 4th SOUTH AFRICA - JINR SYMPOSIUM. Few to Many Body Systems: Models and Methods and Applications, September 21-25, 2015, JINR Dubna, Moscow region, Russia (пленарный доклад);
6. **Neutrino results from reactor experiments: present and future.** XXI DAE-BRNS High Energy Physics Symposium, December 12 2014, Guwahati, India (пленарный доклад);

7. **Recent results from Daya Bay experiment.** 3rd International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2014): Kolymbari, Crete, Greece, July 28-August 6, 2014 (доклад на параллельной сессии);
8. **Neutrino mixing: status and perspectives.** NANPino 2013, 26/06/2013 (пленарный доклад);
9. **Recent results in neutrino physics.** Odessa, August 22-28 2011, Gamov Conference on astronomy and beyond (пленарный доклад);
10. **Vacuum neutrino oscillations with relativistic wave packets in quantum field theory.** Baksan School, May 26-June 2 2011 (пленарный доклад);

11. **Outlook of neutrino physics today.** APCTP-BLTP JINR Joint workshop, May 16-19 2011 (пленарный доклад);
12. **Quantum Field Theory of Neutrino Oscillations in Vacuum and Matter,** XXX workshop Neutrino at accelerators, Dubna, January 25 2008 (пленарный доклад);

и семинарах:

1. **Neutrino mixing: status and perspectives,** 08/02/2013, ОИЯИ, Дубна, РФ;
2. **Phenomenon of neutrino mixing: current status of research,** 18/01/2013, ИЯИ, Москва, РФ;
3. **Precise measurement of the Daya Bay experiment,** 20/12/2012, ОИЯИ, Дубна, РФ;

4. Measurement of neutrino mixing angle in Daya Bay experiment, 14/03/2014, ОИЯИ, Дубна, РФ;
5. Физика нейтрино: статус и перспективы, 3/08/2012, ИЯФ, Новосибирск, РФ;
6. Neutrino oscillations within QFT with relativistic wave packets, 21/11/2011, Брюссель, Бельгия;
7. Осцилляции нейтрино в рамках квантовой теории поля с релятивистскими волновыми пакетами пакетами, 24/02/2011, ОИЯИ, Дубна, РФ;
8. Физика нейтрино, 11/06/2010, ОИЯИ, Дубна, РФ;
9. Neutrino oscillations within QFT with relativistic wave packets, 09/11/2010, Университет г.Льеж, Бельгия;

10. **Neutrino oscillations within QFT with relativistic wave packets**, 05/11/2010, ИНФН, Гран-Сассо, Италия;
11. **Quantum Field Theory of Neutrino Oscillations in Vacuum and Matter**, 16/03/2009, Университет Южной Каролины, США;
12. **Quantum Field Theory of Neutrino Oscillations in Vacuum and Matter**, 06/02/2009, Кеплеровский коллоквиум университета г.Тюбингена, Германия;
13. **Quantum Field Theory of Neutrino Oscillations in Vacuum and Matter**, 09/02/2009, университет г.Бохум, Германия.

1. Впервые разработана теория релятивистского волнового пакета.
2. Разработанная теория применена для вычисления сечения рассеяния релятивистских волновых пакетов в квантовой теории поля.
3. Вычислена вероятность процесса, нарушающего лептонное число, с релятивистскими волновыми пакетами, соответствующими частицам в начальном и конечном состоянии, нейтрино в виртуальном состоянии, источником и детектором нейтрино, разделенными макроскопическим расстоянием.

4. Впервые получена формула для вероятности осцилляций нейтрино в модели релятивистского волнового пакета с учетом пространственной дисперсии эффективного волнового пакета нейтрино и конечных интервалов активности “источника” и “детектора”.
5. Впервые измерено отличное от нуля значение  $\sin^2 2\theta_{13}$  в эксперименте Daya Bay на уровне достоверности, превышающем 25 стандартных отклонений.
6. Впервые достигнута рекордная точность измерения  $\sin^2 2\theta_{13}$  и  $\Delta m^2_{32}$ .

1. Разработанная теория релятивистского волнового пакета может быть применена для исследования фазы матричного элемента в столкновениях пучков частиц; для измерения волновой функции сталкивающихся частиц; для исследования осцилляций нейтрино, рожденных в ускорителях частиц, в реакторах, в атмосфере и в других источниках и для других исследований.
2. Полученная общая формула для вероятности осцилляций нейтрино может применяться при анализе экспериментальных данных с источниками нейтрино.

3. Обнаруженное ненулевое значение  $\sin^2 2\theta_{13}$  открыло путь к измерению иерархии масс нейтрино и фазы, ответственной за нарушение СР-инвариантности, что используется в ряде экспериментов (T2K, NO $\nu$ A) и при подготовке новых экспериментов (JUNO, RENO-50, T2HK, DUNE и др.).
4. Прецизионные измерения  $\sin^2 2\theta_{13}$  и  $\Delta m_{32}^2$  уменьшают систематическую неопределенность в определении иерархии масс нейтрино и параметра лептонной матрицы смешивания – фазы  $\delta$ , ответственной за нарушение СР-инвариантности.

- ▶ “Breakthrough Prize in Fundamental Physics 2016”
- ▶ “Первая Премия ОИЯИ” за цикл работ по эксперименту Daya Bay (2012)
- ▶ “Вторая Премия ОИЯИ” за цикл работ по эксперименту NOMAD (2001)
- ▶ “Первая Премия ОИЯИ” за цикл работ по эксперименту NOMAD (2001)
- ▶ “Первая Премия ЛЯП ОИЯИ” за работы по эксперименту NOMAD (2000, 2001, 2006)
- ▶ “Вторая Премия ЛЯП ОИЯИ” за работы по эксперименту NOMAD (2004)

Согласно INSPIRE найдено 105 статьи, 90 из них опубликованы или в arXiv

Краткие сведения	Цитируемые	Опубликованные
Полное число статей	90	64
Полное число цитирований	5 401	4745
Среднее число цитирований на статью	60.0	74.1
$h_{\text{HEP}}$	30	27

- ▶ Соавтору работ по теории нейтринных осцилляций:  
В. А. Наумову.
- ▶ Коллегам, с кем я обсуждал теорию нейтринных осцилляций: Е. Ахмедову, Т. А. Антошкиной, М. И. Высоцкому, М. О. Гончару, М. А. Долгаревой, И. П. Иванову, А. Е. Калошину, С. Э. Коренблиту, В. А. Рубакову, Д. В. Тайченачеву, О. В. Теряеву, Д.С.Шкирманову, А.С.Шешукову.
- ▶ Моему соавтору по осцилляционному анализу:  
М. О. Гончару.

- ▶ Коллегам по эксперименту Daya Bay: И. Ванг (Y. Wang), В. Ванг (W.Wang), С. Вонг (S. Wong), Х. Вонг (Hin-Lok Henoch Wong), Ю. А. Горнушкин, Ч. Джанг (C. Zhang), Д. Джраффе (D. Jaffe), Д. Двайер (D. Dwyer), Кам-Бью Люк (Kam-Biu Luk), Р. Лейтнер (R. Leitner), Л. Лебановски (L. Lebanowski), Л. Литтенберг (L. Littenberg), Я. Накаджима (Y. Nakajima), Х.Очоа (J. P. Ochoa-Ricoux), Б. Росковец (B. Roskovec), Дж.Сяо (J. Cao), М. Хе (M. He), К. Хеегер (K. Heeger), Э. Хуанг (En Chuan Huang).

- ▶ Коллегам из ОИЯИ: Ю. А. Батусову, В. А. Беднякову, С. А. Бунятову, С. Г. Земской, Г. А. Карамышевой, А. А. Кулькову, Е. С. Морозовой, В. А. Наумову, Е. А. Наумовой, Т. Т. Наумовой, А. Г. Ольшевскому, О. Б. Саймолову, О. Ю. Смирнову, К. А. Трекову, Д. В. Тайченачеву, А. В. Чуканову, И. И. Сидоркиной.
- ▶ Моему учителю: А.Н. Валлу
- ▶ Моей семье: Т. Т. Наумовой, В. А. Наумову, Е. А. Наумовой.